

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**Conception et caractérisation géotechnique des barrières
environnementales à base de poussières de four de cimenterie
et de cendres volantes**

Thèse de doctorat ès sciences appliquées (Ph.D.)
Spécialité: génie civil

Said Rhouzlane

À la mémoire de mon grand-père, Ouarrak Hajj ben Maati,

...Ce travail

REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce à l'aide financière du CRSNG (Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada), de Lafarge Canada et du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de recherche monsieur Gérard Ballivy pour avoir bien voulu m'accueillir dans son laboratoire et diriger l'ensemble de mes travaux. Qu'il soit persuadé de ma profonde reconnaissance et de mon respect.

Je remercie monsieur Achour Bellaloui pour les nombreux conseils qu'il m'a prodigués. Sa collaboration m'a beaucoup appris, ce travail lui doit beaucoup. Je remercie monsieur Arezki Tagnit-Hamou pour m'avoir fait profiter de sa grande expérience dans le domaine de la microstructure, ses conseils scientifiques m'ont grandement aidé. Je remercie monsieur Alexandre Cabral pour m'avoir fourni toutes les bases nécessaires pour le calcul de la diffusion des polluants à travers les barrières réalisées. Je tiens à exprimer ma gratitude à monsieur J.G. Levaque qui a toujours su trouver le temps pour collaborer d'une façon efficace à cette recherche. Je remercie les professeurs Josée Deschênes, Brahim Benmokrane et Jean Perra pour avoir contribué par leurs conseils scientifiques à l'amélioration de ce manuscrit.

Je remercie vivement madame Nicole Laverdière, messieurs Danick Charbonneau, Martin Lizotte et Georges Lalonde, techniciens au Laboratoire de mécanique des roches qui m'ont beaucoup aidé dans la réalisation des différents essais au laboratoire.

Je remercie les étudiants de l'Université de Sherbrooke pour leur amitié, solidarité et soutien moral. Un remerciement spécial à toute la communauté que j'ai côtoyée à Sherbrooke.

Finalement, je remercie chaleureusement mon épouse Jalila, mes enfants Omar, Mossab et Maria et tous les membres de ma famille pour leurs encouragements, en particulier, ma mère Hajja Fatna, Lalla Aicha, ma belle mère Aicha, mon grand frère Sidi Mohamed et mon père Mohamed.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de cette thèse, sont étudiés les principaux facteurs de conception et de caractérisation géotechniques des barrières environnementales à base de poussières de four de cimenterie (CKD) et de cendres volantes (CV).

Pour approcher le comportement général des CKD-CV, quatre poussières les plus représentatives ont été mises à contribution lors de cette recherche: Alpena (Michigan, U.S.A.), Brookfield (Nouveau-Brunswick), Exshaw4 et Exshaw5 (Alberta). Ce choix est justifié par le fait que chaque poussière de four se caractérise par une minéralogie différente surtout en terme de chaux libre, facteur reconnu, entre autre, essentiel dans la stabilisation et la consolidation de ce type de système.

Une fois qu'on a défini au laboratoire le type de mélange approprié, sa méthode de préparation et la maîtrise de la réaction d'expansion, la prochaine étape a consisté essentiellement à déterminer le mode de transport et de mise en place, ainsi que l'évaluation d'effet d'échelle sur les caractéristiques géotechniques. En effet, cette étude a permis l'élaboration d'un cheminement incorporant les paramètres pertinents à considérer en vue de l'élaboration d'un matériau stable et répondant aux critères de performance définis par la durabilité, la ductilité ainsi que par la perméabilité. Un guide de mise en place et de suivi a été produit sous la forme d'éléments nécessaires pour la surveillance et le contrôle de toutes les opérations, pendant et après la mise en place.

L'étude a montré que l'utilisation d'ajouts minéraux, en remplacement d'une partie des poussières de four de cimenterie, améliore les caractéristiques géotechniques des mélanges. En effet, l'étude des propriétés mécaniques, hydrauliques et environnementales, au laboratoire et en chantier, a confirmé que les barrières développées présentent des résistances à la compression, des cohésions, des angles de frottement, des perméabilités, des éléments chimiques lessivés situés dans l'intervalle des critères de sélection. Il en ressort que leur ductilité leur permet de s'adapter aux déformations de fondations des sites d'entreposage.

Les performances mécaniques développées se résument par des résistances à la compression se situent autour de 12 à 14 MPa après 56 jours de mûrissement pour les échantillons élaborés au laboratoire et de 2 à 6 MPa pour les carottes prélevées sur les bancs d'essai. Les perméabilités sont autour de 10^{-8} à 10^{-9} cm/s. Le lessivage au perméamètre ou par TCLP témoigne qu'une fois l'hydratation terminée, le lessivage correspond à un simple lavage des ions libérés ou restant en excès. Les résultats de l'étude expérimentale et de simulation ont montré que les coefficients de diffusion des ions chlores sont dans un intervalle de $6,5 \times 10^{-6}$ à $8,0 \times 10^{-6}$ cm²/s. Ces coefficients sont semblables à ceux développés dans les barrières en argile. Cependant, pour éviter que la barrière perde son rôle d'écran atténuateur, l'épaisseur optimale doit être de l'ordre de 1 m. Les isovaleurs de gonflement établis lors de cette étude montrent que le pourcentage en chaux libre (CaO), en groupements sulfates et en eau ont un effet significatif sur l'expansion. Quand le rapport eau/matériau augmente, le gonflement diminue. Du point de vue pratique, ces isovaleurs sont des abaques destinés à l'estimation du gonflement avant toute mise en place.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the major factors for geotechnical design and characterization of environmental barriers with cement kiln dust (CKD) and fly ash (CV).

For the approach of the CKD-CV general behaviour, four kinds of the most representative dusts have been selected: Alpena (Michigan, U.S.A), Brookfield (New Brunswick), Exshaw-4 and Exshaw-5 (Alberta). This choice was justified in the sense that each of the four kiln dusts is characterized by a specific mineralogical composition i. e.: the free lime content is 3,72 %, 10,35 %, 22,03 % and 40.17 % respectively for Alpena, Brookfield, Exshaw-4, and Exshaw-5. This factor is recognized to be essential for the stabilization and consolidation of the type of system under investigation.

Once the laboratory definition and optimization of the appropriate mix was completed: preparation method, stabilization of the expansion reaction, the next step was essentially to determine the mixing, spreading and compacting methods for field conditions as well as the evaluation of the scale effect on the geotechnical properties. In fact this study has allowed us to elaborate a research path that incorporates the main parameters to be considered in order to secure a stable material which satisfies the performance criteria defined by the durability, the ductility, as well as the permeability. An implantation and follow up guide has been produced under the form of necessary tools for monitoring and control of all operations during and after the implantation process.

The study has showed that the use of mineral admixtures as a substitute to a part of the cement kiln dust improves the geotechnical characteristics of the mixes. In fact, the laboratory study of the mechanical, hydraulic, and environmental properties has confirmed that the barriers developed offer compressive strengths, cohesions, friction angles, permeability, of drained chemical elements located within the interval of the criteria selection. As a result, their ductility allows them to withstand and tolerate the strains of the storage sites foundations.

The hereto elaborated systems present a certain resistance to leaching, and as a result, the risk of infiltration and pollution of ground water is considerably reduced.

The mechanical performances developed are best represented by the compressive strengths in the order of 12 to 14 MPa after 56 days of specimen curing under laboratory conditions, and 2 to 6 MPa for cores extracted from testing bench, while the permeability was found to vary between 10^{-8} and 10^{-9} cm/s. The leaching by the permeameter or by TCLP shows that once the hydration is completed, the leaching corresponds to a simple cleaning of ions, liberated or in excess.

The experimental as well as simulation results have shown that the chloride ions diffusion coefficients are in the interval of $6,5 \times 10^{-6}$ and $8,0 \times 10^{-6}$ cm² /s. These coefficients are similar to those developed by clay barriers. However to avoid the fact that the barrier may loose its attenuation capabilities, the optimal thickness must be around 1m. The swelling iso-values determined in this study show that the percentage of free chalk (CaO), sulfate groups and water have a significant effect on the expansion. When the water/material ratio grows, the swelling drops down. From the practical view point, those iso-values are indispensable tools for preliminary estimation of swelling before any implantation

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1: INTRODUCTION	1
1.1 Nécessité de cette recherche	1
1.2 Objectifs de ce travail	2
Chapitre 2: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
2.1 Introduction	3
2.2 Production des CKD	4
2.2.1 Cycle des matières volatiles dans le four	4
2.2.2 Alcalis	6
2.3 Problématique environnementale	8
2.3.1 Entreposage des poussières de four de cimenterie (CKD)	8
2.3.2 Problèmes environnementaux engendrés par les CKD	10
2.4 Critères de stabilité des barrières à base de CKD	13
2.5 Comportement des CKD avec l'eau	15
2.5.1 Augmentation de température	15
2.5.2 Gonflement des CKD	15
2.5.3 Résistance au gel-dégel	18
2.5.4 Lessivage des matériaux cimentaires	20
2.6 Caractéristiques géotechniques	23
2.6.1 Propriétés hydrauliques	23
2.6.2 Propriétés mécaniques	27
2.7 Ajouts minéraux	30
2.7.1 Réaction pouzzolanique	30
2.7.2 Cendres volantes	31
2.7.3 Ciment	33
2.7.4 Argiles	34
2.8 Conception des méthodes de stabilisation des CKD	34
2.8.1 Techniques d'utilisation des CKD	34
2.8.2 Méthodes de mise en place en chantier	37
2.9 Synthèse	39
Chapitre 3: PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	41
3.1 Objectifs de l'étude	41
3.2 Méthodologie	41
3.3 Variabilité chimique des CKD	42
3.4 Optimisation des mélanges / critères de performance	44
3.4.1 Critères de performance	45
3.4.2 Mélanges à préparer	45
3.5 Essais pilotes en chantier	46
3.6 Techniques d'essai et d'analyse	47
3.6.1 Propriétés texturales	47
3.6.2 Caractéristiques microstructurales	47

3.6.3	Mesures du comportement des mélanges avec l'eau	48
3.6.4	Mesures mécaniques	50
3.6.5	Mesures de perméabilité.....	51
3.6.6	Résistance au lessivage	52
3.6.7	Essais et travaux de contrôle in situ.....	52
Chapitre 4: OPTIMISATION DES MÉLANGES		54
4.1	Caractérisation des CKD	54
4.1.1	Propriétés chimiques des CKD	54
4.1.2	Propriétés physiques des CKD	62
4.1.3	Propriétés minéralogiques des CKD	64
4.2	Caractérisation des ajouts minéraux.....	66
4.2.1	Propriétés chimiques des ajouts minéraux.....	66
4.2.2	Propriétés physiques des ajouts minéraux	68
4.2.3	Propriétés minéralogiques des ajouts minéraux.....	69
4.3	Comportement au compactage des poussières sans ajouts minéraux.....	71
4.4	Caractéristiques mécaniques des mélanges développés.....	73
4.4.1	Poussières du four de l'usine d'Exshaw	73
4.4.2	Poussière du four de l'usine de Brookfield	81
4.4.3	Poussières du four de l'usine d'Alpena	83
4.4.4	Synthèse de la caractérisation mécanique.....	85
4.5	Caractéristiques hydrauliques des mélanges développés	86
4.5.1	Influence des conditions expérimentales sur la perméabilité	86
4.5.2	Résultats expérimentaux	87
4.6	Caractéristiques environnementales des mélanges développés	96
4.6.1	Comportement au lessivage.....	96
4.6.2	Comportement à la diffusion	107
4.7	Gonflement et comportement thermique des mélanges	115
4.7.1	Introduction.....	115
4.7.2	Comportement thermique des mélanges	115
4.7.3	Gonflement à l'eau des mélanges	118
4.7.4	Gonflement à l'air humide.....	122
4.7.5	Élaboration du modèle pour le gonflement	126
Chapitre 5: ESSAIS PILOTES EN CHANTIER		132
5.1	Introduction	132
5.2	Planches d'essais d'Exshaw	132
5.2.1	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	132
5.2.2	Caractéristiques géométriques et localisations des bancs d'essais ...	133
5.2.3	Étapes de construction	133
5.3	Planches d'essais d'Alpena	141
5.3.1	Introduction.....	141

5.3.2	Investigations préliminaires	142
5.3.3	Étapes de construction.....	142
5.3.4	Compactage.....	143
5.3.5	Cellule 1: KG5.....	143
5.3.6	Cellule 2: KG5 et KG6.....	145
5.3.7	Cellule 3: KG6 + 10%CV Edgewater.....	146
5.3.8	Cellule 4: KG5 + 10%CV Edgewater.....	148
5.3.9	Cellule 5: KG6 + 10%CV Nanticoke.....	149
5.4	Synthèse.....	151
5.4.1	Masse volumique	151
5.4.2	Températures.....	151
5.4.3	Résistances à la compression.....	152
5.4.4	Perméabilité	152
Chapitre 6:	ANALYSE ET RECOMMANDATIONS	153
6.1	Mélanges recommandés.....	153
6.2	Guide de mise en place et de contrôle du site.....	154
6.2.1.	Malaxage	154
6.2.2.	Teneur en eau	156
6.2.3.	Dimensions	156
6.2.4.	Énergie de compactage	156
6.2.5.	Curage.....	156
6.2.6.	Surveillance durant la mise en place et le fonctionnement à long terme.....	157
6.2.7	Configuration des barrières recommandées.....	162
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....		163
ANNEXES.....		168
BIBLIOGRAPHIE.....		206

LISTE DES FIGURES

2.1	Four de fabrication du ciment	5
2.2	Schématisation du cycle des matières volatiles dans le four	5
2.3	Schéma de localisation de l'usine Brookfield	11
2.4	Section E-E' usine Brookfield	12
2.5	Formation des phases hydratées dans le ciment Portland	22
2.6	Exemples de courbes effort-déformation	28
3.1	Programme expérimental	42
3.2	Plan de travail.....	43
3.3	Dispositifs de simulation de la migration des contaminants par diffusion et par diffusion-advection	45
3.4	Gonflement à l'air humide ou à l'eau	49
3.5	Gonflement à l'eau	49
4.1	Diagramme ternaire (SiO ₂)-(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)-(CaO+MgO)	59
4.2	Diagramme ternaire (SiO ₂)-(K ₂ O+Na ₂ O)-(CaO+MgO)	60
4.3	Diagramme ternaire (CaO+MgO)-(K ₂ O+Na ₂ O)-(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	60
4.4	Diagramme ternaire (SiO ₂)-(K ₂ O+Na ₂ O)-(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	61
4.5	Courbes granulométriques de différentes poussières.....	63
4.6	Vue générale de la poussière de Brookfield au microscope électronique à balayage...	70
4.7	Vue générale de la poussière d'Alpena au microscope électronique à balayage.....	71
4.8	Évolution de la résistance à la compression pour le mélange K5+10%CV	75
4.9	Représentation graphique du critère de Fairhurst pour les mélanges K5+10%CV et K5+10%CV+2%C à 28 jours	77
4.10	Allure de la résistance mécanique à 28 jours en fonction de la teneur en eau initiale...	78
4.11	Essai de compression simple avec mesures extensométriques pour un mélange de K5+10%CV+2%C.....	78
4.12	Résistance mécanique en fonction du pourcentage de bentonite.....	79
4.13	Évolution de la compression simple des mélanges de K4.....	80
4.14	Masse volumique sèche et compression simple en fonction du rapport E/M.....	82
4.15	Représentation graphique du critère de Fairhurst pour Brookfield à 28 jours	83
4.16	Évolution de la perméabilité du mélange Brookfield.....	88
4.17	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV Saint-Clair	89
4.18	Évolution de la perméabilité en fonction de la masse volumique sèche du mélange Exshaw4+10%CV Saint-Clair	89
4.19	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV	90
4.20	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=45%	90
4.21	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=50%	91

4.22	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=55%	91
4.23	Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV+2%C avec E/M=50% ...	92
4.24	Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV River Rouge.....	94
4.25	Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV Nanticoke	95
4.26	Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV Pulliam.....	95
4.27	Stabilité des quelques hydrates en fonction du pH	98
4.28	Stabilité de la calcite en fonction du pH et de la température	99
4.29	Évolution de pH des lixiviats recueillis au perméamètre.....	99
4.30	Évolution de la concentration en calcium des lixiviats recueillis au perméamètre.....	100
4.31	Évolution de la concentration de sodium des lixiviats recueillis au perméamètre	101
4.32	Évolution de la concentration des sulfates des lixiviats recueillis au perméamètre	102
4.33	Concentrations de métaux lourds dans la poussière non conditionnée d'Alpena.....	103
4.34	Diagramme de solubilité des métaux en fonction du pH.....	108
4.35	Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières K5+10%CV	109
4.36	Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières K5+10%CV+2%C...	110
4.37	Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières Brookfield	110
4.38	Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 45 cm	111
4.39	Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 75 cm	111
4.40	Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 100 cm	112
4.41	Évolution des concentrations maximales sous la barrière K5+10%CV à différentes épaisseurs	112
4.42	Domaines d'application des différents modes de transport des contaminants	113
4.43	Évolution de la température en fonction du temps de malaxage et du pourcentage de cendres volantes pour un rapport eau/matériau de 0,5.....	115
4.44	Évolution de la température lors du malaxage en fonction du temps et du pourcentage d'eau dans le mélange.....	116
4.45	Teneur en eau fonction du rapport eau/matériau initial	117
4.46	Température en fonction de la chaux libre.....	117
4.47	Évolution des températures de la planche d'essai en laboratoire (Exshaw5)	118
4.48	Phénomène de gonflement observé en laboratoire (Exshaw5).....	119
4.49	Phénomène de gonflement observé sur chantier (Alpena)	119
4.50	Évolution des gonflements à l'eau des différents mélanges à base d'Exshaw5	120
4.51	Évolution des gonflements à l'eau des différents mélanges à base d'Exshaw4	121
4.52	Structure de l'ettringite $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}, 26\text{H}_2\text{O}]$	122
4.53	Évolution du gonflement et de la température: Brookfield.....	123
4.54	Évolution du gonflement - teneur en eau E/M: Brookfield.....	123
4.55	Évolution du gonflement et de la température: Exshaw5+10%CV.....	124
4.56	Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96).....	124
4.57	Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96)+10% Nanticoke...	125
4.58	Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96)+10% Edgewater..	125
4.59	Correspondance entre le gonflement mesuré et le gonflement estimé	130
4.60	Estimation du gonflement à l'air humide	131

5.1	Caractéristiques géométriques des bancs d'essais.....	134
5.2	Localisation des prélèvements d'échantillon: cellule 1 et cellule 2	136
5.3	Évolution de la température à 20 cm dans la cellule 2 (CKD+10%CV+2%C).....	137
5.4	Évolution de la température à 50 cm dans la cellule 2 (CKD+10%CV+2%C).....	137
5.5	Forages pour la réalisation des essais de perméabilité, le suivi de lixiviation et le prélèvement de carottes.....	138
5.6	Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 1	144
5.7	Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 2	146
5.8	Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 3	147
5.9	Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 4	148
5.10	Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 5	150
5.11	Corrélation entre les masses volumiques Shelby-nucléodensimètre	151
6.1	Comparaison des CKD dans le diagramme ternaire	153
6.2	Cheminement expérimental pour l'élaboration d'un matériau stable à base de poussières de four de cimenterie	155
6.3	Installation du tube à oxygène.....	159
6.4	Schéma de la sonde pour la mesure de la conductivité.....	160
6.5	Piézomètre pour la récupération	161
6.6	Installation des drains agricoles et les puits de captage	161
6.7	Schéma de la barrière double à base du mélange CKD+10%CV	162
6.8	Schéma de la barrière simple à base du mélange CKD+10%CV+2%C.....	162

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Résultats des analyses chimiques des CKD.....	6
2.2	Grille des critères indicatifs de la contamination des sols et de l'eau souterraine.....	14
2.3	Critères pour les mélanges sols-ciment.....	20
2.4	Résistance et durabilité des mélanges CKD-sable	20
2.5	Comparaison entre la perméabilité au terrain et celle au laboratoire.....	26
2.6	Valeurs de modules d'élasticité.....	29
2.7	Valeurs de résistance à la compression.....	29
2.8	Propriétés de quelques types de cendres volantes canadiennes.....	33
4.1	Intervalle de la variation chimique des CKD.....	54
4.2	Analyse chimique moyenne des CKD	55
4.3	Composition chimique des CKD	55
4.4	Variabilité chimique des CKD	57
4.5	Poussières représentatives de la variabilité chimique des CKD.....	61
4.6	Analyse physique de certaines poussières	62
4.7	Composition minéralogique des CKD avant hydratation.....	64
4.8	Composition minéralogique des CKD après 1 jour d'hydratation	65
4.9	Variabilité chimique de la cendre volante de Nanticoke	67
4.10	Composition chimique des cendres volantes.....	67
4.11	Propriétés physiques des ajouts minéraux.....	68
4.12	Indice de pouzzolanicité à 28 jours	69
4.13	Résistances mécaniques des cendres volantes Exshaw-ciment	69
4.14	Composition minéralogique des mélanges Alpena	70
4.15	Température pour 2 min de malaxage pour une masse de 3 kg	72
4.16	Valeurs de résistance à la compression et à la traction à 7 jours.....	74
4.17	Valeurs de la résistance à la compression et à la traction pour le mélange K5+10%CV+2%ciment	76
4.18	Valeurs des essais de compression simple avec mesures extensométriques.....	77
4.19	Résistance à la compression de K4+10%CV Exshaw - Saint-Clair	80
4.20	Paramètres dynamiques.....	81
4.21	Résultats des essais Proctor normalisés - Brookfield	81
4.22	Évolution des résistances - Brookfield	82
4.23	Résultats des essais aux ultrasons pour la poussière Brookfield	82
4.24	Essais de compression simple avec mesures extensométriques.....	83
4.25	Caractéristiques physiques et mécaniques d'Alpena + ajouts.....	84
4.26	Vitesses longitudinales des mélanges d'Alpena + ajouts	85
4.27	Caractéristiques des perméabilités.....	93
4.28	Concentration des éléments toxiques dans les CKD.....	96
4.29	Concentration des métaux par TCLP des mélanges Alpena	105
4.30	Concentration des métaux lourds par TCLP des mélanges Exshaw et Brookfield	106
4.31	Propriétés des mélanges pour évaluation environnementale	107
4.32	Matrice des essais	127

4.33	Matrice des effets	128
4.34	Paramètres estimés du modèle statistique.....	128
4.35	Répétabilité des paramètres testés au centre.....	129
5.1	Résultats des mesures de perméabilité dans les cellules de démonstration	139
5.2	Résultats des perméabilités sur les carottes récupérées à 30 cm dans les cellules.....	139
5.3	Résultats des mesures sur les carottes de la cellule 2	139
5.4	Lessivage au perméamètre: échantillon 1.....	140
5.5	Lessivage au perméamètre: échantillon 2.....	141
5.6	Spécifications des planches d'essai d'Alpena	141
5.7	Teneur en eau - masse volumique, Alpena.....	142
5.8	Propriétés géotechniques de mise en place - Banc d'essai 1	144
5.9	Résultats mécaniques, hydrauliques et de lessivage - Banc d'essai 1.....	145
5.10	Propriétés géotechniques de mise en place - Banc d'essai 2	145
5.11	Résultats mécaniques, hydrauliques et de lessivage - Banc d'essai 2.....	146
5.12	Propriétés géotechniques de mise en place - Banc d'essai 3	147
5.13	Résultats mécaniques, hydrauliques et de lessivage - Banc d'essai 3.....	147
5.14	Propriétés géotechniques de mise en place - Banc d'essai 4	148
5.15	Résultats mécaniques, hydrauliques et de lessivage - Banc d'essai 4.....	149
5.16	Propriétés géotechniques de mise en place - Banc d'essai 5	149
5.17	Résultats mécaniques, hydrauliques et de lessivage - Banc d'essai 5.....	150
6.1	Recommandation des mélanges selon l'utilisation	154

LISTE DES SYMBOLES

C	Cohésion
C_0	Résistance à la compression simple (MPa)
CKD	Poussière de four de cimenterie (<i>cement kiln dust</i>)
E	Module d'élasticité (GPa)
E/M	Pourcentage de l'eau initial du mélange sec (poussière+cendre volante+ciment)
EPA	Environmental Protection Agency
ϕ	Angle de frottement
K	Perméabilité (cm/s)
MENVIQ	Ministère de l'environnement du Québec
ν	Coefficient de Poisson
PCA	Association du ciment Portland (<i>Portland Cement Association</i>)
ρ_h	Masse volumique humide (kg/m^3)
ρ_s	Masse volumique sèche (kg/m^3)
σ	Contrainte normale
S	Degré de saturation (%)
τ	Résistance au cisaillement
T	Température ($^{\circ}\text{C}$)
t	Temps (s)
T_0	Résistance à la traction (MPa)
w	Teneur en eau (%)

1. INTRODUCTION

1.1 Nécessité de cette recherche

Les poussières de four de cimenterie (*cement kiln dust: CKD*) peuvent constituer un déchet au sens de la loi. Même si, fréquemment, les poussières de four de cimenterie ne sont pas considérées comme un déchet nocif, elles peuvent le devenir en regard des lois futures, de plus en plus sévères.

Mises en contact avec l'eau, ces poussières de four génèrent principalement trois types de contaminants:

- des métaux lourds, dont les normes de teneurs minimales sont très sévères;
- des sels communs, dont la teneur est également réglementée;
- de la chaux vive responsable de l'augmentation du pH.

Afin de rendre ce déchet inerte pour l'environnement, la solution proposée est de l'enfouir dans les carrières résultant de l'activité des cimenteries, dans un état consolidé et éventuellement stabilisé au moyen de liants hydrauliques peu coûteux (cendres volantes, laitiers, etc.). Ce traitement global des poussières à leur sortie du four est préféré ici à leur isolation à l'aide de membrane ou "liner" dont la mise en place est plus complexe.

Des recherches réalisées au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke [ROUIS, 1991] ont montré qu'il est possible d'obtenir un produit inerte, imperméable et stable à des concentrations bien spécifiques de CKD et d'ajouts minéraux.

La gestion des poussières de four de cimenterie concerne des quantités très importantes: plusieurs milliers de tonnes sont produites annuellement au Canada. Il est donc essentiel que les technologies de stabilisation développées puissent s'appuyer sur de solides connaissances du comportement physico-chimique des poussières avant et après la stabilisation. L'implantation en chantier de ces technologies nécessitera également le développement de procédure simple de mise en place afin que ces dépôts répondent aux objectifs environnementaux du producteur et des agences gouvernementales.

1.2 Objectifs de ce travail

L'objectif principal de cette recherche est l'étude de la consolidation de quatre types de CKD relativement représentatives avec des ajouts minéraux peu coûteux, qui peuvent être eux-mêmes des déchets d'autres industries (cendres volantes, laitiers, etc.). L'idée générale est de concevoir un cheminement ou un protocole à mettre en oeuvre pour l'élaboration de systèmes à base de CKD et ajouts chimiquement stables et répondant aux critères mécanique et hydraulique requis pour répondre aux spécifications exigées.

L'objectif secondaire est de réussir le transfert des connaissances acquises en laboratoire vers les industries du ciment au niveau de chaque usine concernée. Ces connaissances comprennent les méthodes de sélection des mélanges adéquats (CKD + ajouts minéraux) et les méthodes de mise en place. Une fois stabilisées et consolidées, ces mélanges peuvent être mis à profit pour réhabiliter d'autres résidus générés par certaines activités industrielles.

Cette introduction fait office de chapitre 1. Le chapitre 2 a pour but d'établir l'état de la question. Après avoir rappelé et analysé les travaux consacrés aux études des poussières de four de cimenterie, le chapitre 3 est consacré aux objectifs du sujet de recherche, à la méthodologie développée, aux techniques d'essais et d'analyse utilisées ainsi que la présentation des échantillons et des essais effectués. Le chapitre 4 inclut tous les travaux d'optimisation des mélanges en laboratoire, à savoir la caractérisation des matériaux et la détermination des propriétés mécaniques, hydrauliques et environnementales des mélanges développés. Le chapitre 5 illustre l'extrapolation des résultats accumulés en laboratoire à plus grande échelle sur site en mettant à profit des cellules de démonstration.

Pour conclure, une méthodologie est proposée pour la stabilisation des CKD par ajouts minéraux en laboratoire. Des recommandations sont énoncées sur la formulation des mélanges, la mise en place des barrières qui peuvent être utilisées pour l'élaboration de barrières d'enfouissement ou de recouvrement ou pour la fermeture des sites préexistants.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

En Amérique du Nord, les estimations récentes de production de déchets sont de l'ordre de 400 à 500 millions de tonnes de déchets municipaux, de 600 à 800 millions de tonnes de déchets industriels et de 50 à 60 millions de tonnes de déchets dangereux [KOERNER et RICHARDSON, 1987]. La préoccupation croissante pour l'environnement et les nouvelles législations nord-américaines ont considérablement modifié l'approche des compagnies industrielles ou minières, qui, bien que préoccupés pour l'effet des tendances économiques actuelles adaptent progressivement une attitude plus responsable vis-à-vis de la préservation du patrimoine, dans la perspective d'un "développement économique durable et environnementalement respectable" [BOUCHARD, S. 1991; DROUIN, C. 1989].

En 1991, Rouis a présenté des exemples de contamination de milieu naturel par les lixiviats des déchets entreposés de façon non conforme aux règles de respect et de protection environnementale:

- Site d'enfouissement de déchets domestiques: ville Lasalle (Québec) [SHOIRY 1985];
- Site d'entreposage de déchets industriels: Sfax (Tunisie) [ROUIS et coll., 1990];
- Site d'entreposage de résidus miniers: parc à résidus Solbec-Cupra . [ROCHE, 1987].

Afin de réduire la migration des contaminants dans l'environnement, il est maintenant pratique courante d'assurer l'étanchéité du fond et des parois des bassins d'entreposage des résidus industriels à l'aide de barrières naturelles ou artificielles, constituées de matériaux imperméables.

Une barrière environnementale est un élément d'isolation hydraulique et chimique [ROWE, 1988]. Elle doit assurer une isolation la plus parfaite possible du milieu environnant vis-à-vis du lixiviat des déchets et des éléments ou composés chimiques (Annexe 1).

De telles barrières d'étanchéité (liner) peuvent être conçues généralement à partir de matériaux appropriés, déjà en place ou transportés et amendés, ou à l'aide de matériaux synthétiques tels les géomembranes, le béton projeté, les enduits bitumineux [RITCEY, 1989;

OWEIS et coll., 1990; CHAPUIS, 1990; FOLKES, 1982; Groupe Géotechnique de Montréal, 1987; HUTCHISON, 1990; KOERNER, 1984]. Dans le cas des matières synthétiques, seules les géomembranes, particulièrement les polyéthylène à haute densité (HDPE), semblent posséder les qualités nécessaires pour une application à grande échelle, bien que leur durabilité à long terme reste à être démontrée.

Les sols argileux ont été employés comme matériaux pour les barrières environnementales. En raison des difficultés d'approvisionnement, et surtout des problèmes posés par leur mise en place et leur grande susceptibilité aux effets climatiques, les argiles ne semblent pas appropriées dans certains cas [AUBERTIN, 1993].

Les barrières à base de cendres volantes ont fait l'objet de très peu d'essais [BOWDERS, 1987].

En guise de substitut à ses matériaux meubles d'origine naturelle, il a été proposé notamment [BALLIVY, 1987; ROUIS, 1991] l'utilisation des poussières de four de cimenterie comme matériaux pour les barrières hydrogéologiques.

2.2 Production des CKD

2.2.1 Cycle des volatiles dans le four

Samet (1995) a étudié l'effet de la nature de l'atmosphère du four sur la microstructure des clinkers produits et surtout sur la distribution des alcalis et du soufre dans les différentes phases du clinker. Dans la partie relative au cycle des volatiles dans le four (Figure 2.1), elle précise que durant la fabrication du ciment Portland, l'alimentation du four en matière première et le combustible contiennent généralement des composés mineurs volatiles. Il s'agit essentiellement de composés de potassium, de sodium, de soufre et de chlore. Ces produits passent à l'état de vapeur dans les zones les plus chaudes du four et se condensent dans les parties les plus froides [BUCCHI, 1981b]. Ces deux transformations dépendent notamment de la durée et des conditions de cuisson, ainsi que des matériaux présents.

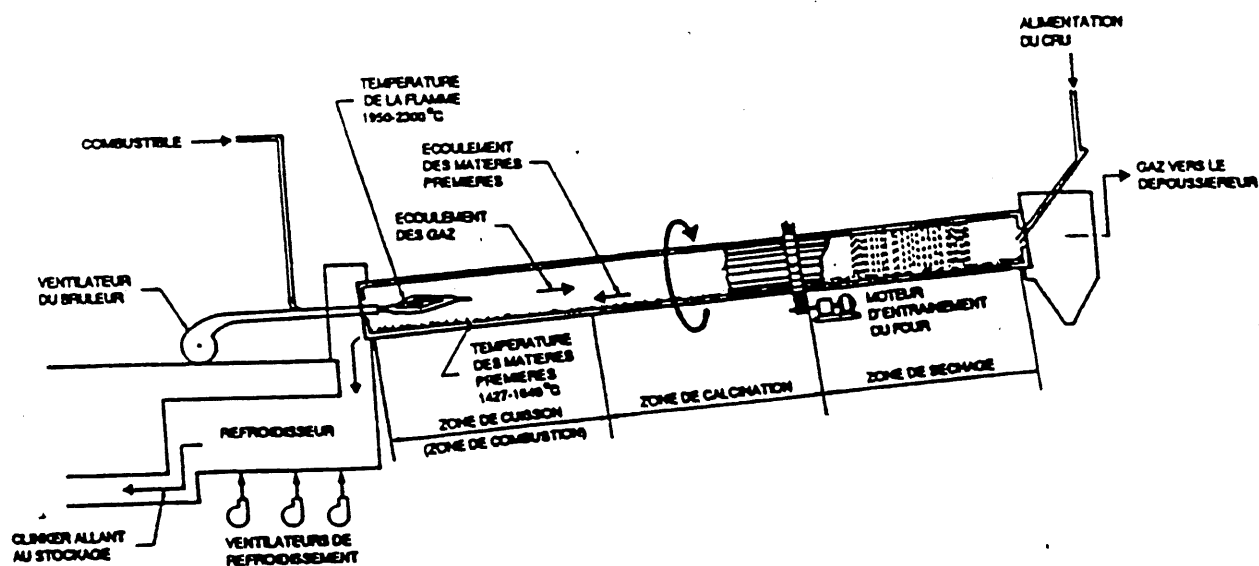


Figure 2.1 Four de fabrication du ciment

La volatilisation se fait sur une certaine portion du four, son intensité maximale n'est pas obtenue au même niveau pour les différents composés. Les vapeurs se condensent sur les particules de poussière entraînées par le flux gazeux et sur la matière se déplaçant à contre courant. Les particules de poussière recouvertes d'éléments volatils condensés adhèrent à tout obstacle rencontrant le flux gazeux comme les parois réfractaires, les échangeurs de chaleur, etc. [BUCCHI, 1981b]. En général, le condensat est ramené vers les zones chaudes par les matériaux solides, où il se retransforme en vapeur. Ainsi, il se crée un cycle de matières volatiles à l'intérieur du four (Figure 2.2).

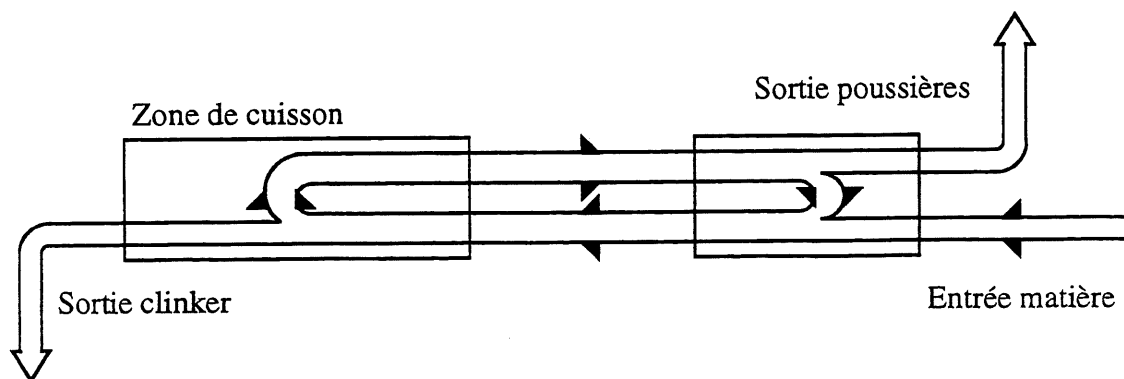


Figure 2.2 Schématisation du cycle des matières volatiles dans le four [SAMET, 1995]

Le cycle peut-être fermé, quand les composés volatils se condensent complètement et reviennent aux zones chaudes, ou bien ouvert, quand une partie de ces produits quitte le four.

La sublimation des composés volatils commence à partir de 700-800°C. Elle peut-être classée par ordre décroissant comme suit: $Cl > K > S > Na$. L'existence de ces composés volatils, même en faibles proportions, modifie le déroulement des réactions à l'intérieur du four et, par conséquent, la minéralogie des phases du clinker. À titre d'exemple, les alcalis et le soufre modifient la viscosité de la phase fondue qui se forme lors de la cuisson et, par conséquent, influent sur les processus de germination et de croissance cristalline en favorisant l'un des processus par rapport à l'autre.

2.2.2 Alcalis

Le mélange de matières premières ou encore le crû d'alimentation du four contient généralement des oxydes mineurs (MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 et TiO_2) en quantités assez importantes.

TABLEAU 2.1 RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES CKD [MILLER 1980]

Éléments	Pourcentage		
	Faible	Moyen	Élevé
SiO_2	6,0	16,5	28,5
Al_2O_3	3,2	4,4	9,6
Fe_2O_3	0,8	2,7	5,9
CaO			
De 9 sources	16,0	47,6	65,0
De 13 sources	8,3	12,6	20,2
MgO	0,8	2,3	4,8
SO_3	0,7	7,1	26,3
Na_2O	0,1	0,8	3,2
K_2O	1,1	5,5	26,2
Perte au feu	2,5	16,0	32,0

Les alcalis se combinent préférentiellement au soufre pour donner des sulfates de sodium et de potassium. S'il y a un excès de soufre par rapport aux alcalis, un sel double contenant aussi du calcium ($2CaSO_4$, K_2SO_4) se forme. Parfois, en présence d'un excès de soufre, l'anhydrite ($CaSO_4$) est décelée. Par contre, s'il y a un excès d'alcalis, ces derniers peuvent former des solutions solides dans les phases majeures du clinker et surtout dans le C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) et le C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) [BYE, 1983].

Les composés alcalins du clinker peuvent être divisés en trois groupes [JAWED et SKALNY, 1977; SAMET 1992]:

- les sulfates alcalins;
- les alcalis dans les phases aluminates et aluminoferrite (les aluminates alcalins);
- les alcalis dans les silicates (les silicates alcalins).

Le soufre se combine de préférence aux alcalis pour donner, selon les quantités d'alcalis et de soufre, les sulfates alcalins suivants:

- le sulfate de potassium K_2SO_4 : arcanite;
- le sulfate de sodium et de potassium $Na_2SO_4, 3K_2SO_4$: aphtitalite;
- le sulfate de calcium et de potassium $2CaSO_4, K_2SO_4$: calcium langbeinite.

Les sulfates alcalins peuvent passer rapidement en solution et modifier l'état ionique de l'environnement des grains. Les sulfates alcalins des clinkers influencent l'hydratation initiale et la prise des ciments en changeant la concentration des espèces ioniques dans la phase liquide; la solubilité élevée des sulfates alcalins engendre une baisse de Ca^{++} qui modifie les vitesses de nucléation et de cristallisation des produits d'hydratation.

Chatterjee (1983) conclut que les alcalis dans les phases du clinker tendent à augmenter les résistances à long terme. Au contraire et selon Strunge et coll. (1986), l'incorporation des alcalis dans les phases de clinker, les résistances à la compression baissent.

Après formation des sulfates alcalins, les alcalis se substituent dans les réseaux cristallins des phases de clinker. Les aluminates en occupent plus que la moitié. Le sodium rentre dans le réseau cristallin du C_3A cubique pour donner une structure orthorhombique, le potassium en fait de même [TAGNIT-HAMOU, 1995].

La bélite (C_2S) fixe plus d'alcalis et de soufre que l'alite (C_3S) dont la réactivité est très peu influencée par les alcalis.

La teneur totale en alcalis, exprimée par Na_2O équivalent ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$), varie de 0,3 à 1,5%. Si la teneur en Na_2O équivalent est inférieure 0,6%, le ciment est considéré comme ayant une faible teneur en alcalis. Si la teneur en Na_2O équivalent est supérieure à 1%, le ciment est considéré comme très riche en alcalis et des expansions sont susceptibles de se produire dans les bétons contenant des granulats réactifs (réactions alcalis-granulats).

En général, une quantité élevée d'alcalis dans le ciment peut induire les effets suivants:

- prise rapide;
- augmentation des résistances initiales;
- diminution des résistances finales;
- augmentation du retrait;
- développement des réactions alcalis-granulats.

2.3 Problématique environnementale

2.3.1 Entreposage des poussières de four de cimenterie (CKD)

Quatre approches générales sont utilisées pour gérer les CKD dans les cimenteries: le recyclage direct, traitement et retour au four, entreposage et/ou réutilisation. Un sondage [EPA, 1993] définit trois unités de gestion de déchets sur place pour les CKD:

- les décharges;
- les amoncellements;
- les bassins.

97% des cimenteries ont classé leur unité comme étant l'un de ces trois types; 3% ont indiqué qu'elles géraient les CKD en utilisant une légère variation de ces trois types.

a) Les décharges (landfills)

Dans les cimenteries, les décharges sont généralement les méthodes les plus utilisées pour la gestion. Dans les réponses au sondage, elles constituent 52% des unités de gestion des déchets. Pour disposer les CKD, ces sites d'enfouissement ne sont pas faits selon les règles de l'art. Souvent, les CKD sont déposés dans une portion retirée de la carrière de calcaire ou dans un ravin

proche. Ce matériau est, soit transporté par camion vers la carrière ou pompé comme un "slurry". Dans une opération typique, les CKD sont transportés par camion à la carrière où elles sont déposées juste au bord. Les poussières demeurent à cet endroit pendant quelques temps exposées aux conditions climatiques, après quoi, elles sont remises dans la carrière.

b) Les amoncellements (piles)

Les amoncellements constituent 43% des unités de gestion des déchets. Ce genre d'entreposage peut être contenu dans une carrière ou non. Par exemple, l'usine de ciment de Ash Grove à Inkom, Idaho, il y a à peu près vingt ans, se débarrassait des CKD en plusieurs larges amas au bord de la carrière de l'usine. Les amas ont été depuis couverts par du schiste et on pouvait observer de la végétation qui poussait sur la surface de plusieurs amas.

c) Les bassins (ponds)

Les bassins d'évacuation dans les usines de ciment sont différents des décharges et des amas dans le sens que les CKD sont stockés sous l'eau. Ceci est un type de gestion des déchets assez rare et seulement un des répondants du sondage indiqua qu'il gérait les CKD de cette manière. Cependant, l'usine de ciment de Holnam Inc. à Artesia, Mississippi a construit un amas actif de CKD tout le long du bord d'une carrière inactive remplie d'eau pour constituer un lac. L'amas actif s'étendra encore plus dans le lac au fur et à mesure que les CKD s'accumulent. L'utilisation de bassins crée une charge hydraulique permanente sur la poussière, entraînant la migration de contaminants vers les eaux souterraines.

d) Les dimensions

L'ampleur des unités de gestion des déchets de CKD varie de façon considérable selon le type d'unité, l'âge et la quantité de poussière abandonnée. Les réponses à l'étude du sondage EPA de 1993 ne donnent pas de données claires sur le volume de CKD contenu dans les unités de gestion des déchets. Cependant, l'épaisseur de l'unité et les mesures de la surface ont été rapportées. L'information disponible de l'étude est insuffisante au calcul des volumes totaux car des suppositions non fondées sur la géométrie des unités uniformes (une forme cylindrique ou rectangulaire) donnerait des résultats inexacts.

2.3.2 Problèmes environnementaux engendrés par les CKD

Les problèmes environnementaux causés par les poussières de four de cimenterie sont de deux types: l'encombrement et le risque de pollution des eaux souterraines par le lessivage de composés toxiques. Le risque de contamination des eaux souterraines et de ruissellement trouve son origine dans la présence de substances solubles ou lessivables telles les sulfates, carbonates, chlorures, alcalis et métaux. La contamination se traduit par une élévation du pH et par la présence dans les eaux de substances à risque, parfois en teneur dépassant les limites fixées par les normes environnementales [BALLIVY et coll., 1992].

Une description succincte des problèmes posés par l'usine Brookfield peut être citée à titre d'illustration. Cette usine est localisée dans la province de la Nouvelle-Brunswick, Canada, à 5 km du village Brookfield et à 7,5 km à l'est de la rivière Shubenacadie. Les poussières produites par cette usine constituent des dépôts actifs et de monticules abandonnés (Figure 2.3). La zone d'assise se caractérise par une fondation formée d'un sol dont la composition moyenne est de 8% de gravier, 34% de sable, 32% de silt et de 26% d'argile (Figure 2.4). Le gradient hydraulique est de 0,56. À partir des analyses effectuées dans les puits d'observation à proximité du site, les eaux souterraines et les eaux de surface sont contaminées. Les puits privés avoisinants le site sont sujets à une contamination certaine. Certains dépôts de cette usine en contact avec la nappe phréatique contribuent de façon non négligeable au phénomène de lessivage.

Un cas jugé plus sévère est relevé en Alberta où la cimenterie Exshaw en produisant 70 tonnes de CKD quotidiennement, se retrouve avec cinq monticules de poussières de four occupant environ 20 hectares pouvant atteindre parfois 15-20 m de hauteur. Devant l'ampleur de la contamination observée, le Ministère de l'environnement provincial de l'Alberta (AEP: Alberta Environmental Protection) a contraint les industriels à la restauration du site précité. En effet, cette investigation visant la couverture de ces résidus et la récupération des eaux usées est prévue à l'automne 1997.

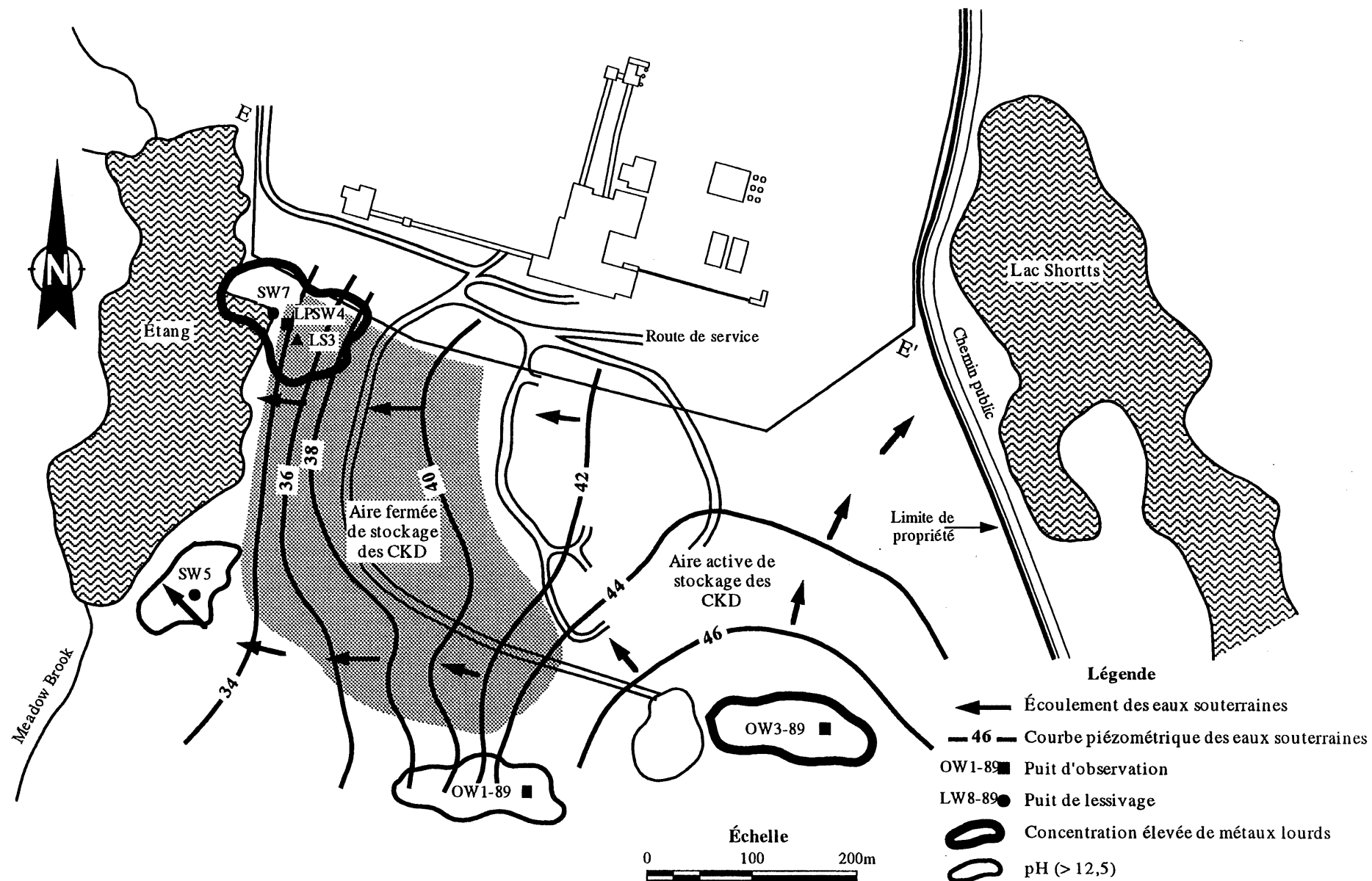


Figure 2.3 Schéma de localisation de l'usine Brookfield

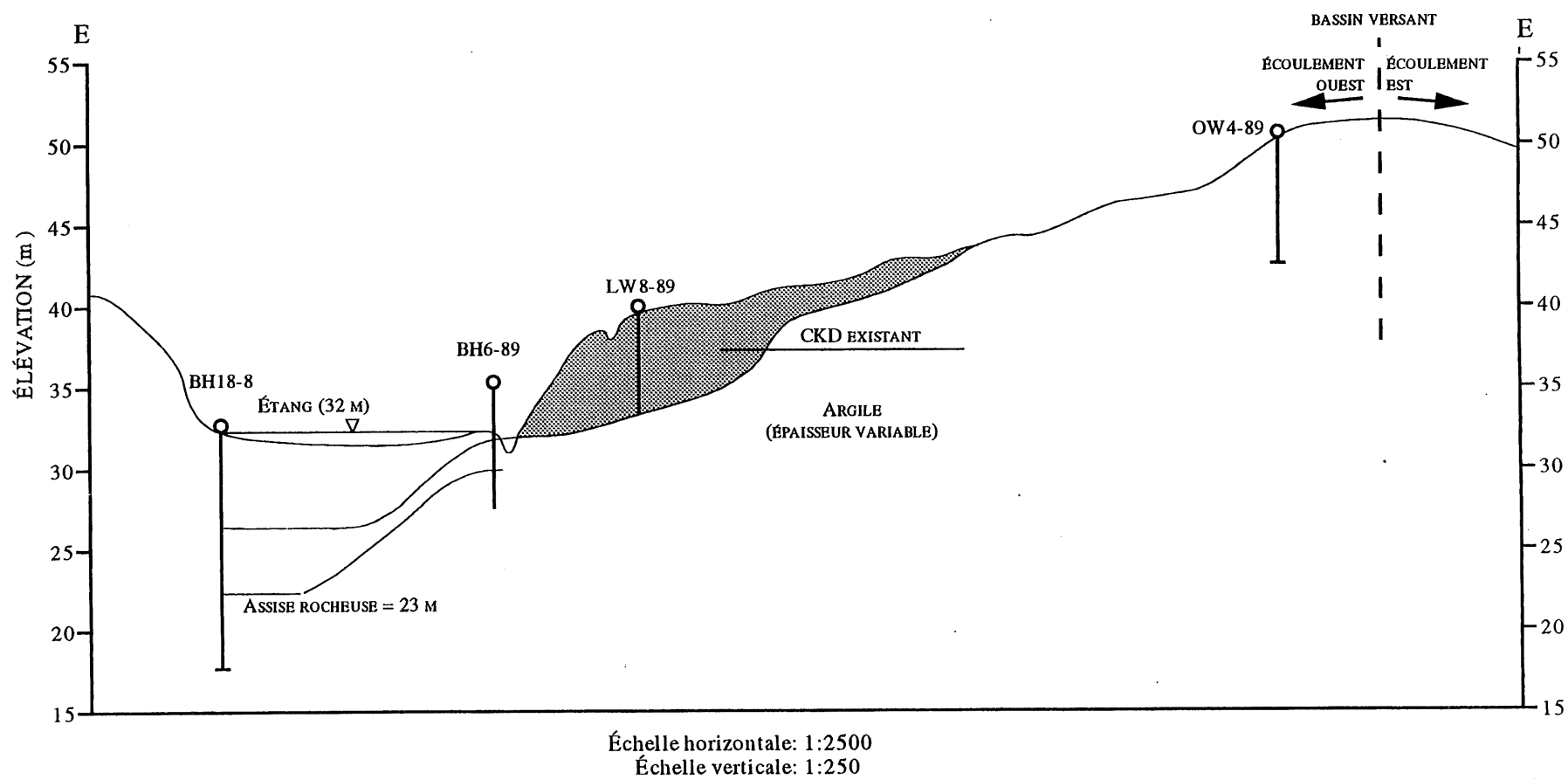


Figure 2.4 Section E-E' usine de Brookfield

2.4 Critères de stabilité des barrières à base de CKD

La longévité d'un matériau concerne la stabilité de l'ensemble des propriétés chimiques et minéralogiques ainsi que les caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques qui en découlent durant toute la période de son utilisation. La notion de longévité se trouve étroitement liée à deux notions qui doivent être définies cas par cas : d'une part la signification et les limites de la stabilité recherchée et, d'autre part, la durée de vie. Il est nécessaire que la barrière ne montre aucun changement d'état pouvant entraîner une défaillance quelconque dans le rôle de protection devant être assuré pendant des périodes très longues: de 50 à 100 ans.

Beaucoup de progrès ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de l'évaluation de la longévité des barrières en argile compactée. Les progrès réalisés dans le cas de ces argiles n'ont pas d'équivalent pour les matériaux à base de liants hydrauliques. Les seuls progrès réalisés concernent l'effet des ions chlore et magnésium sur les propriétés mécaniques des coulis. Beaucoup de travail reste à faire dans la compréhension de l'effet de la nature du fluide de circulation sur l'état des hydrates et sur les propriétés de la pâte qu'ils forment.

En absence de critères quantitatifs et qualitatifs pour l'évaluation de la longévité des barrières en poussières de four de cimenterie, on propose un ensemble de principes sur la base desquels la longévité sera jugée.

Les barrières de poussières de four stabilisées doivent posséder une grande ductilité afin d'éviter toute fissuration (liée à un comportement fragile du matériau en particulier) qui pourrait entraîner des fuites de lixiviats, et d'assurer une bonne adaptation de la barrière aux déformations anisotropes du sol de fondation telles que des tassements différentiels de faible ampleur.

De plus, les barrières d'étanchéité doivent aussi satisfaire à des critères de performance hydrauliques et environnementaux. Selon les réglementations de l'EPA, la valeur limite autorisée de perméabilité pour des matériaux servant à la construction de lieux d'enfouissement et de stockage est de:

$$K_{\text{lim}} = 10^{-7} \text{ cm/s} \quad (2-1)$$

Le ministère de l'Environnement du Québec [MENVIQ, 1994] propose trois critères: A, B et C, applicables aux contaminants présents dans les sols et dans l'eau souterraine (Tableau 2.2). Le critère A correspond à une concentration représentative du bruit de fond, c'est-à-dire une valeur représentative des concentrations naturelles moyennes. Le critère C donne la limite supérieure au-delà de laquelle des mesures de décontamination doivent être entreprises. Le critère B partage la place A-C en deux zone AB et BC. Des études sont exigées dès qu'un contaminant dépasse le B, cependant, la réhabilitation du sol n'est exigée que pour certains cas.

TABLEAU 2.2 GRILLE DES CRITÈRES INDICATIFS DE LA CONTAMINATION DES SOLS ET DE L'EAU SOUTERRAINE. (Version mise à jour en juillet 1994, MENVIQ)

		Sols mg/kg de matière sèche (ppm)			Eaux souterraines (ppb) µg/l		
		A	B	C	A	B	C
I - Métaux							
Argent	(Ag)	2	20	40	5	20	200
Arsenic	(As)	10	30	50	5	50	100
Baryum	(Ba)	200	500	2 000	50	1 000	2 000
Cadmium	(Cd)	1,5	5	20	1	5	20
Cobalt	(Co)	15	50	300	10	50	200
Chrome	(Cr)	75	250	800	15	40	500
Cuivre	(Cu)	50	100	500	25	500	1 000
Étain	(Sn)	5	50	300	10	30	150
Mercuré	(Hg)	0,2	2	10	0,1	0,5	1
Molybdène	(Mo)	2	10	40	5	20	100
Nickel	(Ni)	50	100	500	10	250	1 00
Plomb	(Pb)	50	500	1 000	10	50	100
Sélénium	(Se)	1	3	10	1	10	50
Zinc	(Zn)	100	500	1 500	50	5 000	10 000
II - Polluant minéraux							
NH ₄		N.A.	N.A.	N.A.	200	500	1 500
Br dissous ²		N.A.	N.A.	N.A.	100	500	2 000
Br disponible		20	50	300	N.A.	N.A.	N.A.
CN disponible		1	10	100	40	200	400
CN total		5	50	500	40	200	400
F dissous ²		N.A.	N.A.	N.A.	300	1 500	4 000
F disponible		200	400	2 000	N.A.	N.A.	N.A.
PO ₄ (en P)		N.A.	N.A.	N.A.	50	100	700
NO ₃ (en N)		N.A.	N.A.	N.A.	10	10 000	---
NO ₂ (en N)		N.A.	N.A.	N.A.	20	1 000	---
Sulfure (H ₂ S)		N.A.	N.A.	N.A.	10	20	500
S total		500	1 000	2 000	---	---	---
N.A. : Non applicable --- : Pas de critère actuellement (juillet 1994)							

2.5 Comportement des CKD avec l'eau

2.5.1 Augmentation de température

Certaines poussières contiennent beaucoup de chaux libre (35 à 40%) et présentent une forte réactivité avec l'eau, ce qui entraîne, en conséquence, un grand dégagement de vapeur et une augmentation de la température du mélange. L'augmentation de température mesurée lors du malaxage pour différents rapports eau/poussières varie entre 6°C à 80°C [VINCENT, 1993; RHOUZLANE et coll., 1995].

2.5.2 Gonflement des CKD

La plupart des échantillons compactés ou non ont montré une forte tendance au gonflement, en particulier, lors de leurs contacts avec l'eau. Les seuls essais de gonflement réalisés sur les poussières sont relatés par Vincent (1993). Les résultats ont montré que les valeurs pour les gonflements à l'air humide des CKD, augmentent avec la teneur en eau et que leur maximum est, en général, atteint à 48 heures. Cependant, ceux mûris à l'eau présentent un facteur de 2,5 fois le gonflement à l'humidité [VINCENT, 1993].

D'après Lafuma (1929), les aluminates sont relativement insolubles en présence d'hydroxyde de calcium et l'expansion est due à la transformation à l'état solide des aluminates de calcium en ettringite.

Les thèmes concernant l'expansion sont nombreux et parfois contradictoires. En faisant un bilan de l'étude bibliographique, nous pouvons nous poser quelques questions importantes:

- Quelle est la nature des minéraux expansifs?
- Quel est le mécanisme de déroulement de l'expansion?
- Quelle est la nature des forces qui provoquent l'expansion?

a) Nature des minéraux expansifs

Lachaud (1979) attribue les désordres créés dans les produits de ciment, d'une part, à l'expansion par l'ettringite et, d'autre part, à l'association de l'ettringite et de la thaumasite dans les milieux riches en carbonates. En 1973, Mehta attribuait l'expansion uniquement à l'ettringite.

Certains auteurs l'attribueraient à la transformation à l'état solide du C_4AH_{13} en hydrate monosulfate [NEGRO, et BACHIORRINI, 1982]. Clastres (1984) confirme les observations de Negro et Bachiorrini et indique que, à aucun moment de l'expansion, la formation de monosulfate d'alumine n'a pu être mise en évidence. Regourd (1986) attribue la détérioration des bétons de ciment Portland à la cristallisation du gypse, de l'ettringite et de la thaumasite. Enfin, Dron et Brivot (1989) affirment que l'ettringite n'est pas en soi un produit expansif, mais que c'est la formation à partir des composés nécessaires et dans des conditions appropriées qui provoque l'expansion.

De ce bilan rapide de l'étude bibliographique, il est possible de retenir que l'expansion est régie par la formation de produits expansifs tels que l'ettringite, le gypse et, dans certains cas spécifiques, la portlandite.

b) Les mécanismes de l'expansion

Les auteurs sont divisés en deux écoles de pensée concernant ce mécanisme d'expansion:

- La théorie de la croissance cristalline [BROWN, 1970; COHEN, 1982; DRON et BRIVOT, 1989]
- La théorie colloïdale [CHATTERJEE et JEFFREY, 1963; MEHTA, 1973, 1986, 1993; LACHAUD, 1979; NEGRO et BACHIORRINI, 1982; CLASTRES et coll., 1984].

- Théorie de la croissance cristalline

Selon cette théorie, l'expansion est due à la pression de cristallisation exercée par les cristaux d'ettringite qui enveloppent la surface des particules. Une grande importance est donnée, dans cette théorie, aux dimensions des particules expansives dans le contrôle de l'amplitude et du taux d'expansion. L'expansion est, par conséquent, contrôlée par le nombre de noyaux de cristallisation ainsi que par la vitesse de croissance des cristaux.

- Théorie colloïdale

Pour cette école, l'expansion apparaît à la suite de la croissance des cristaux d'ettringite colloïdale qui se forment à travers un mécanisme de dissolution des différents composés chimiques de départ.

Contrairement à la première, cette école n'accorde pas d'importance à la taille des particules expansives au départ puisque tout passe en solution avant l'expansion. Par contre, elle accorde une grande importance à l'existence de la chaux qui affecte la taille des cristaux d'ettringite et, par conséquent, le taux et l'amplitude de l'expansion. En effet, en présence de chaux, de sulfates, d'eau et d'autres particules silico-aluminates, l'ettringite est formée en petits cristaux. En l'absence de chaux, les sulfates et l'eau réagissent avec ces particules pour donner de grands cristaux d'ettringite qui ne contribuent pas à l'expansion.

Certains points concordent entre les deux théories [CLASTRES et coll., 1984]. Dans les mélanges expansifs, l'ettringite est le premier hydrate à se former, et cela, dès le malaxage; pour que l'ettringite formée soit expansive, il est nécessaire que la phase liquide soit saturée en chaux; la taille des cristaux d'ettringite formés au début de l'hydratation affecte l'expansion; l'expansion peut se poursuivre alors que la quantité d'ettringite cristalline formée et décelable par rayons X reste stable; l'expansion n'apparaît que lorsque la structure de la pâte a atteint un niveau suffisant de résistance mécanique; le type de conservation ou de cure des mélanges a une importance capitale sur le taux d'expansion.

Le point de discordance entre les deux mécanismes réactionnels développés fait intervenir la nature et l'origine des précurseurs de la nucléation ettringétique. En ce sens, le premier développement préconise une croissance cristalline à partir des nucléides des particules d'ettringite expansive, tandis que la deuxième approche milite en faveur d'une nucléation au sein même de la solution suivie par un développement de la croissance cristalline à partir des espèces ioniques disponibles dans l'eau interstitielle.

c) Origine des forces d'expansion

L'origine des forces d'expansion dues à l'ettringite est aussi sujette à controverse. Depuis 1952, Thorvaldson a expliqué les variations de volumes dans les produits de ciment par l'action de forces osmotiques semblables à celles qui provoquent le gonflement et la dessiccation des gels ou des argiles [THORVALDSON, 1952].

En 1970, Brown conclut que la croissance cristalline de l'ettringite à partir des solutions ne peut être la source d'énergies mécaniques vu que le seul paramètre thermodynamique contrôlant la formation et la croissance des cristaux est la température de la solution. On montre qu'il n'y a aucune libération significative de l'énergie mécanique. On admet l'existence de ces forces de répulsion mécanique quand l'expansion se fait par croissance cristalline [BROWN, 1970].

En 1973, Mehta soutient la théorie de l'expansion par répulsion électrique. Il considère que la grande surface spécifique de l'ettringite colloïdale et sa structure cristalline particulière avec des charges négatives sont responsables de l'attraction d'un grand nombre de molécules d'eau qui entourent les cristaux d'ettringite et provoquent des répulsions entre les particules. L'expansion du milieu a ainsi lieu sans aucun changement dans le treillis formé par l'ettringite [MEHTA, 1973].

2.5.3 Résistance au gel-dégel

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer l'action du gel sur les matériaux cimentaires hydratés tels que les CKD [GAGNÉ, 1992; PIGEON, 1987]. Le problème de la fissuration interne a été abordé de façon fondamentale par trois théories particulièrement élaborées. Il s'agit de la théorie de la pression hydraulique [POWER, 1949], de la théorie des pressions osmotiques [POWERS et HELMUTH, 1953; POWERS, 1975] et de la théorie de Litvan (1972).

En 1949, Powers avançait l'hypothèse que ce sont des pressions hydrauliques qui sont responsables de la détérioration des pâtes de ciment lors du gel. Selon cette hypothèse, lorsque la température baisse, la glace se forme d'abord dans les gros capillaires. Lorsque le volume total de cette glace et l'eau qui est encore présente dans le pore, dépasse le volume de ce pore, soit que l'eau est expulsée du pore ou qu'elle y reste confinée et crée des contraintes dans la cavité. À cause de la nature poreuse de la pâte de ciment, l'excès d'eau peut s'échapper vers le vide le plus proche. Si l'intensité de la pression qui force ce mouvement d'eau dépasse la résistance à la traction du solide, la rupture de ce dernier suivra.

La notion de distance critique a été développée en se basant sur le fait que la résistance au mouvement d'eau est proportionnelle à la longueur que l'eau expulsée doit parcourir. Les pressions hydrauliques dépasseront la résistance du matériau si le trajet à parcourir est plus grand que cette distance critique.

Les expériences menées par Powers et Helmuth en 1953 ont montré que la contraction initiale des échantillons lors du refroidissement en dessous de 0°C est plus grande que celle calculée avec le coefficient d'expansion thermique. Ils ont aussi observé que lorsque la température est maintenue constante en dessous de 0°C, l'échantillon continue à s'allonger. Il a été suggéré que ce phénomène est dû au mouvement de l'eau vers les régions où se forme de la glace. Car lors du gel, les pores où la glace se forme contiennent non seulement de la glace mais aussi une solution plus concentrée en sels (alcalis). Dès lors, l'eau se déplacera vers les régions les plus concentrées en alcalis par un mouvement d'osmose. Si ces pores sont déjà remplis de glace et de solution d'alcalis, des pressions osmotiques destructives seront générées.

Litvan (1972) a proposé un mécanisme différent pour le gel. Sa théorie est basée sur le même principe de migration d'eau produisant des pressions hydrauliques. Ces résultats obtenus en travaillant avec de la silice de verre (matière poreuse comme la pâte de ciment) ont servi à la formulation de la nouvelle théorie.

Baghdadi et ses collaborateurs (1995) ont soumis des mélanges de sable de dune avec les CKD à 12 cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage. Ces essais de durabilité ont été exprimés en terme de poids perdu à la fin des cycles. Ils ont présenté certains critères pour les mélanges sol-ciment montrés dans le tableau 2.3.

L'association de ciment Portland (PCA) recommande une perte en poids maximale, pour le gel-dégel et le mouillage-séchage des sols de 14%.

L'étude [BAGHDADI, 1995] a montré que les CKD ne respectent pas cette condition pour le gel-dégel (Tableau 2.4).

TABLEAU 2.3 CRITÈRES POUR LES MÉLANGES SOLS-CIMENT [BAGHDADI, 1995]

Objectif	UCS ^a (kPa)	CBR ^b (%)	Gonflement - (%)	Perte par mouillage- séchage (%)
Remplissage de tranchées	343-1 030	20-80	2	7
Fondation de route pour circulation légère	687-1 373	50-150	2	10
Protection des berges	1 373-5 492	200-600	2	14
Chenaux hydrauliques	> 5 492	600	2	14
^a Résistance à la compression non confinée à 7 jours à l'air humide.				
^b CBR des échantillons mûris à l'eau durant 4 jours.				

TABLEAU 2.4 RÉSISTANCE ET DURABILITÉ DES MÉLANGES CKD-SABLE [BAGHDADI, 1995]

CKD (%)	Temps de mûrissement (jours)	Température (°C)	UCS (kPa)	CBR (%)	Perte de poids par mouillage-séchage (%)	Perte de poids par gel-dégel (%)
30	7	25	1 650	206	7	28
50	7	25	2 280	317	4	12
100	7	25	6 320	288	9	30

2.5.4 Lessivage des matériaux cimentaires

Le lessivage est le processus qui, par l'effet d'un ajout liquide, dissout les composés d'un résidu et les transporte dans l'environnement. Les termes "lessivage", "lavage" et "lixiviation" sont équivalents. Les essais de lixiviation correspondent aux tests de caractérisation des déchets spécifiés notamment par le MENVIQ ("Procédure d'évaluation des caractéristiques des déchets solides et des boues pompables, 1985) et par le U.S. EPA ("Toxicity Characteristic Leaching Procedure - TCLP", 1993). Contrairement aux essais de lessivage réalisés sur les échantillons de sol compactés dans des colonnes, les essais de lixiviation se font dans des réacteurs dans lesquels les sols sont mis en suspension dans une phase liquide [COUTURE, 1994]. Dans les deux cas, un agent de solubilisation dit "extractif" est requis pour annihiler les mécanismes d'adsorption retenant le contaminant. Ces procédés produisent donc une solution contaminée qui devra aussi être traitée. Au cours d'un traitement par lessivage, l'application d'un gradient hydraulique assure la circulation de l'agent extractif à travers les pores du sol. L'efficacité et la durée de ce type de traitement sont respectivement limitées par l'existence de chemins d'écoulement préférentiels et par la perméabilité du milieu poreux.

Selon Mehta et Monteiro (1993), tout environnement ayant un pH plus petit que 12,5 est considéré comme agressif pour un produit cimentaire; ceci entraîne un déséquilibre éventuel des produits d'hydratation [PALARDY, 1996]. Toujours selon ces auteurs, le lessivage des hydrates des hydroxydes de calcium, par le passage de fluide agressif, expose les autres produits d'hydratation à la décomposition chimique. Éventuellement, les gels de silice et d'aluminium seront laissés avec peu ou pas de résistance. Par contre ces gels sont presque insolubles et ne sont détériorés que sous des conditions extrêmes et ce durant une période de temps relativement longue [MIDNESS et YOUNG, 1981].

Regourd (1993) a identifié deux réactions chimiques entraînant une augmentation de la porosité de la matrice cimentaire et ainsi une hausse de la perméabilité: les réactions entraînant l'hydrolyse et le lessivage de composés de la pâte de ciment durci ou encore, les réactions d'échange entre le fluide agressif et les constituants de la pâte durcie.

L'efficacité des injections de coulis de ciment dans les massifs rocheux micro fissurés [BALLIVY et coll.,1988] a été examinée en laboratoire à l'aide d'essais de perméabilité et de lessivage sur des éprouvettes de roche non fissurées et injectées. Les résultats indiquent que le pH du filtrat d'une roche intacte augmente d'une valeur comprise entre 0,5 et 1,0 pour atteindre une valeur approximativement égale à 7,5. Selon Rouis (1991), le pH des barrières aux cendres volantes augmente très rapidement dès le premier jour de circulation à 11,4 pour se stabiliser aux alentours de 12,6 dès le troisième jour. Dans le cas des barrières aux fumées de silice, l'augmentation du pH est rapide durant la première semaine de circulation. Il atteint 12,7 au bout de quelques semaines. Le comportement du pH des barrières aux ajouts combinés est de 7,5 environ au premier jour, le pH passe à 12,5 à la fin de la première semaine pour se stabiliser finalement à 12,6. Ces valeurs de pH assurent les conditions d'alcalinité nécessaires à la longévité des barrières développées et permettent de limiter considérablement la dissolution des composés de calcium.

Calleja (1980) signale que la solubilité de la portlandite est fonction du pH de l'eau de percolation. Selon Revertégat (1992) et ses collaborateurs, avec la diminution du pH, la pâte de

ciment est essentiellement altérée par décalcification, la première source de calcium étant la portlandite et la seconde provenant des CSH et des aluminates.

Rouis (1991) avait trouvé que les concentrations en solides totaux des lixiviats des barrières aux cendres volantes baissent pour ensuite se stabiliser à 8,5 g/l. Pour les deux mélanges à base de fumées de silice proposées, les concentrations se stabilisent à partir du dixième jour à environ de 7 g/l. Les valeurs maximales de ce lessivage coïncident avec l'atteinte du taux maximum de portlandite formée, avec la baisse du taux d'apparition de l'ettringite et, surtout, avec la forte augmentation du taux de CSH obtenu dans le mélange. Ces trois phénomènes ont lieu à 7 jours comme il a été montré par Richartz sont illustrés à la figure 2.5 [ROUIS, 1991].

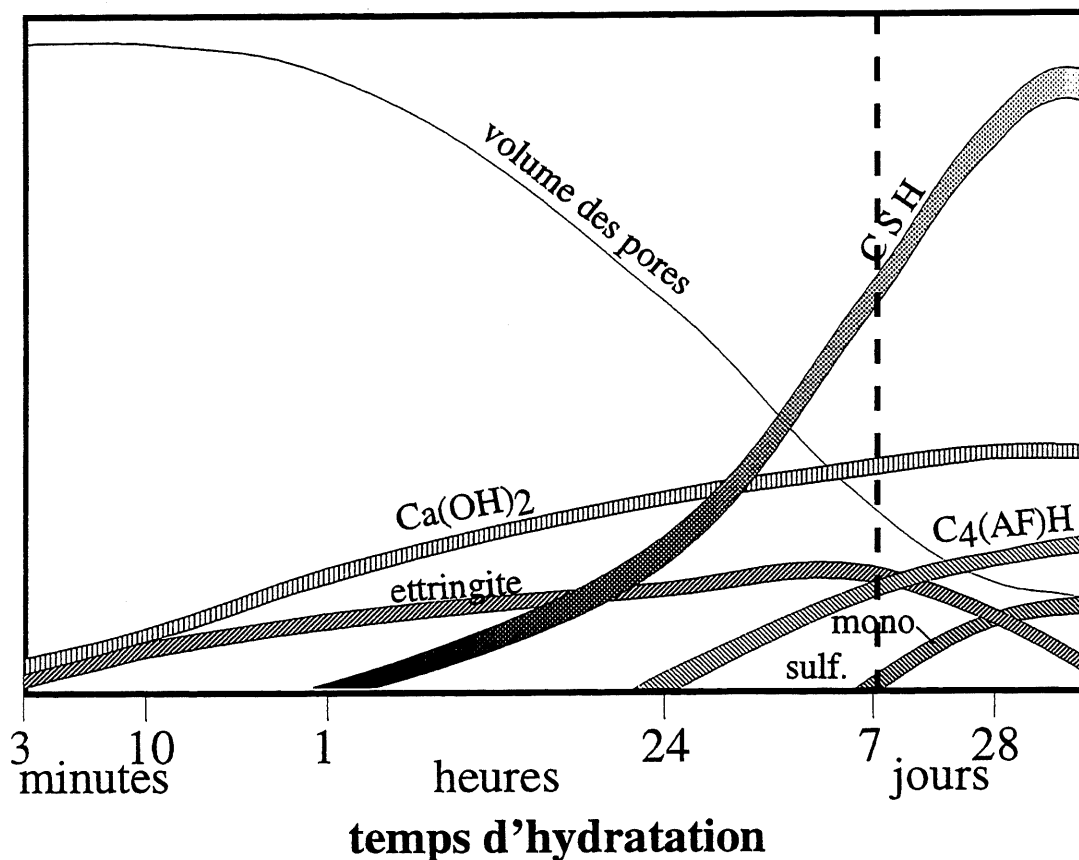


Figure 2.5 Formation des phases hydratées dans le ciment Portland [ROUIS, 1991].

2.6 Caractéristiques géotechniques

2.6.1 Propriétés hydrauliques

La perméabilité est une des propriétés des sols les plus difficiles à mesurer avec précision. Les difficultés généralement rencontrées sont dues en grande partie au régime permanent d'écoulement à obtenir dans la cellule de mesure et au degré de saturation à atteindre.

La perméabilité est le paramètre primordial à connaître pour la réalisation de projets de défense contre la contamination des eaux souterraines. Dans la pratique, l'efficacité d'une barrière est définie essentiellement par un coefficient de perméabilité K inférieur à 10^{-7} cm/s avec une stabilité dans le temps [MORGENSTERN, 1985; DANIEL, 1987; HERMAN et coll., 1987].

La technique de mesure de la perméabilité d'un matériau cimentaire dépend des agents agressifs présents dans le milieu où sera éventuellement placé le matériel. Si l'agent agressif est un gaz, tel le CO_2 ou le SO_2 , alors une mesure de la perméabilité au gaz est la plus justifiée. Par contre, si le matériel est exposé à des liquides alors on recommande de mesurer la perméabilité à l'aide de la technique de perméabilité à l'eau ou aux ions chlore [PERRATON, 1988].

Le gradient de charge hydraulique est le principal moteur du mouvement de l'eau dans les sols; il n'est cependant pas le seul. On a en effet constaté expérimentalement qu'un milieu poreux soumis à d'autres gradients est aussi le siège d'écoulement d'eau. Ce sont principalement:

- gradient de potentiel électrique : l'eau se déplace des voltages élevés vers les voltages bas. Ce principe a été utilisé pour le drainage électrocinétique des sols peu perméables [CASAGRANDE, 1952].
- gradient de concentration chimique: l'eau se déplace des zones à fortes concentrations vers celles à faibles concentrations. Cet effet fait aussi partie de l'effet osmotique, qui de plus engendre une filtration sélective des ions en solution.
- gradient thermique: écoulement des zones à fortes températures vers les zones à faibles températures. Ce phénomène a de l'importance dans la formation des lentilles de glace dans les sols [HARLAN, 1973].

Onofrei et coll. (1991) mentionnent que les coulis conventionnels utilisent un rapport eau-ciment deux fois trop grand par rapport à l'eau requise pour l'hydratation des phases initiales. Ainsi lorsque le coulis est durci, l'eau n'ayant pas participé à l'hydratation du ciment sera piégée dans la structure solide et créera une porosité élevée. Cette porosité augmente du même coup la perméabilité du matériel et diminue sa longévité. En fabriquant des coulis avec des rapports eau-ciment élevés, la formation d'une quantité plus importante de portlandite Ca(OH)_2 est favorisée. Cette dernière, étant très réactive, peut créer un matériau moins résistant aux attaques chimiques.

Ballivy et coll. (1990) mentionnent que la conductivité hydraulique pour les coulis à jeune âge (environ 4 jours) est inférieure à 10^{-9} m/s, tandis que pour un coulis de trois à quatre semaines, celle-ci devient inférieure à 10^{-13} m/s. Ce phénomène est dû à l'hydratation progressive de la pâte de ciment fermant peu à peu les chenaux où pouvait circuler l'eau auparavant [NIEMANTS, 1981]. Dans le même ordre d'idée, Mehta (1986) montre que pour un rapport eau-ciment de 0,63, les pores capillaires présentent 50% du volume total à 7 jours de cure. Ce pourcentage diminue à 33 % après une année de cure.

En complément à ces facteurs, d'autres éléments influencent la perméabilité des matériaux cimentaires [MINDESS et YONG, 1981; MEHTA, 1986; HEARN et coll., 1993]:

- la porosité capillaire;
- la distribution de la grosseur des pores;
- la tortuosité des chenaux d'écoulement;
- l'anisotropie du milieu.

En se basant sur l'approche standard utilisée en géotechnique, il a été décidé de traiter les poussières de four de cimenterie comme des sols compactables et de déterminer ainsi leur perméabilité en fonction de leur masse volumique sèche [ROUIS, 1991; TODRES, 1992; RMT, 1992; VINCENT, 1993; BALLIVY et coll., 1994].

La perméabilité est étudiée suivant deux modes d'écoulement et de confinement. Le premier mode détermine une perméabilité radiale divergente. Ce dernier est proche des conditions que l'on pourrait rencontrer in situ. Le second mode, qui détermine une perméabilité en mode longitudinal et dans un état confiné, donne, quant à lui, une borne inférieure de la perméabilité.

- Comparaison entre la perméabilité mesurée en laboratoire et celle mesurée in situ: causes de divergence des résultats

Les essais de laboratoire doivent autant que possible reproduire les conditions réelles du terrain. Cependant, on a fréquemment observé que la valeur de K in situ pour des sols argileux pouvait être 10 à 100 fois supérieure à celle mesurée en laboratoire [AUGHENBAUGH, 1990; MITCHELL et MADSEN, 1987; SHACKELFORD, 1990]. Cette différence s'explique en partie par la présence de défauts dans la microstructure dus à la présence d'agrégats de particules argileuses.

Afin d'estimer la perméabilité du matériau avec plus de certitude, il est nécessaire d'effectuer les essais de laboratoire avec le lixiviat naturel du site, puisque la perméabilité des sols (et les autres propriétés) peut être grandement affectée par la chimie du fluide interstitiel [MITCHELL et MADSEN, 1987; SHACKELFORD, 1990]. On sait, par exemple, que l'épaisseur de la double couche d'eau absorbée autour des palettes d'argile est diminuée lorsque la concentration ou la valence des ions en solution augmente et si le pH ou la constante diélectrique du liquide diminue [MITCHELL, 1976]. Une telle diminution de l'épaisseur de la double couche peut signifier une modification de la microstructure ce qui peut augmenter l'espace disponible pour l'eau libre, non liée engendrant ainsi une augmentation de K . Shackelford (1990) a ainsi observé, sur un mélange sable-bentonite, que la valeur de K augmentait de 3×10^{-8} à 2×10^{-7} cm/s si le fluide utilisé passait de l'eau à une solution saturée en Ca^{2+} . L'ampleur de ces modifications dépend aussi de l'activité de l'argile et de sa capacité d'échange cationique (CEC), qui sont eux-mêmes reliées à la composition minéralogique des particules.

Les CKD sont très actifs et peuvent présenter un fort potentiel de gonflement. Lors de la mesure de la perméabilité en laboratoire ce phénomène se produit pendant la saturation de l'échantillon au cours de l'essai. La mesure de perméabilité de ce type de matériau sans prendre en compte le phénomène de gonflement n'est pas représentative des conditions réelles in situ (cas des fonds et couvertures des décharges).

D'après Elsbury et coll. (1990), le gonflement est considéré comme un facteur qui contribue à l'augmentation de la perméabilité des sols. Dans la littérature, plusieurs controverses apparaissent quant au degré de divergence entre les résultats de laboratoire et ceux obtenus in situ. Le tableau 2.5 présente quelques exemples de sources d'erreurs et leur magnitudes trouvées dans la littérature [DANIEL, 1984]. La fiabilité de ces résultats dépend étroitement des méthodes utilisées pour la mesure de perméabilité aussi bien en laboratoire que sur chantier.

Suite à ces considérations, il semble que l'erreur provenant de la représentativité de l'échantillon testé à l'ensemble du sol sur terrain est difficile à éviter.

TABLEAU 2.5 COMPARAISON ENTRE LA PERMÉABILITÉ AU TERRAIN ET CELLE AU LABORATOIRE [DANIEL, 1984]

Source potentielle d'erreur	K (moyen terrain) / K (laboratoire)
Compaction à teneur en eau plus élevée en laboratoire que sur terrain	10 à 1 000
Compaction plus énergique en laboratoire que sur le terrain	10 à 1 000
Substance nuisible qui ne sont pas présentes en laboratoire	10 à 1 000
Compaction statique (ou par impact) plutôt que par pétrissage pour préparer les échantillons en laboratoire	1 à 10
Saturation imparfaite en laboratoire	1 à 10
Utilisation de forts gradients hydrauliques en laboratoire entraînant la migration des fines	1 à 10
Écoulement permanent non atteint	1 à 10
Échantillon testé en laboratoire est plus petit	1 à 1 000
Fissures de dessiccation sur chantier	pas de données

2.6.2 Propriétés mécaniques

a) Critères de rupture

Les critères les plus utilisés ont été énoncés par Coulomb et par Fairhurst.

Le critère de COULOMB est défini par:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2-2)$$

avec τ résistance au cisaillement;
 σ contrainte normale;
 ϕ angle de frottement interne du matériau;
 c cohésion.

Le critère de FAIRHURST est donné par les expressions suivantes:

$$\tau = \frac{m-1}{n} \cdot C_0 \cdot \sqrt{1 + n \frac{\sigma}{C_0}} \quad (2-3)$$

$$m = \sqrt{n-1} \quad (2-4)$$

et
$$n = \frac{C_0}{T_0} \quad (2-5)$$

avec C_0 résistance à la compression simple;
 T_0 résistance à la traction.

Selon Hoek et Brown (1980), le critère de Coulomb est valable dans le domaine des petites déformations, alors que celui de Fairhurst est plus adapté au domaine des grandes déformations.

Ainsi, le critère de Coulomb convient pour décrire le comportement à la rupture de la plupart des sols, alors que celui de Fairhurst est plus adapté pour les roches.

b) Ductilité des barrières à développer

La réponse des matériaux aux sollicitations imposées se traduit, dans la plupart des cas, par l'apparition de l'une des deux formes de rupture suivantes (Figure 2.6): rupture fragile ou rupture ductile.

Les barrières en poussières de four stabilisées doivent donc posséder une grande ductilité afin d'éviter toute fissuration (liée à un comportement fragile du matériau en particulier) qui pourrait entraîner des fuites de lixiviat, et d'assurer une bonne adaptation de la barrière aux déformations anisotropes du sol de fondation telles que des tassements différentiels de faible ampleur.

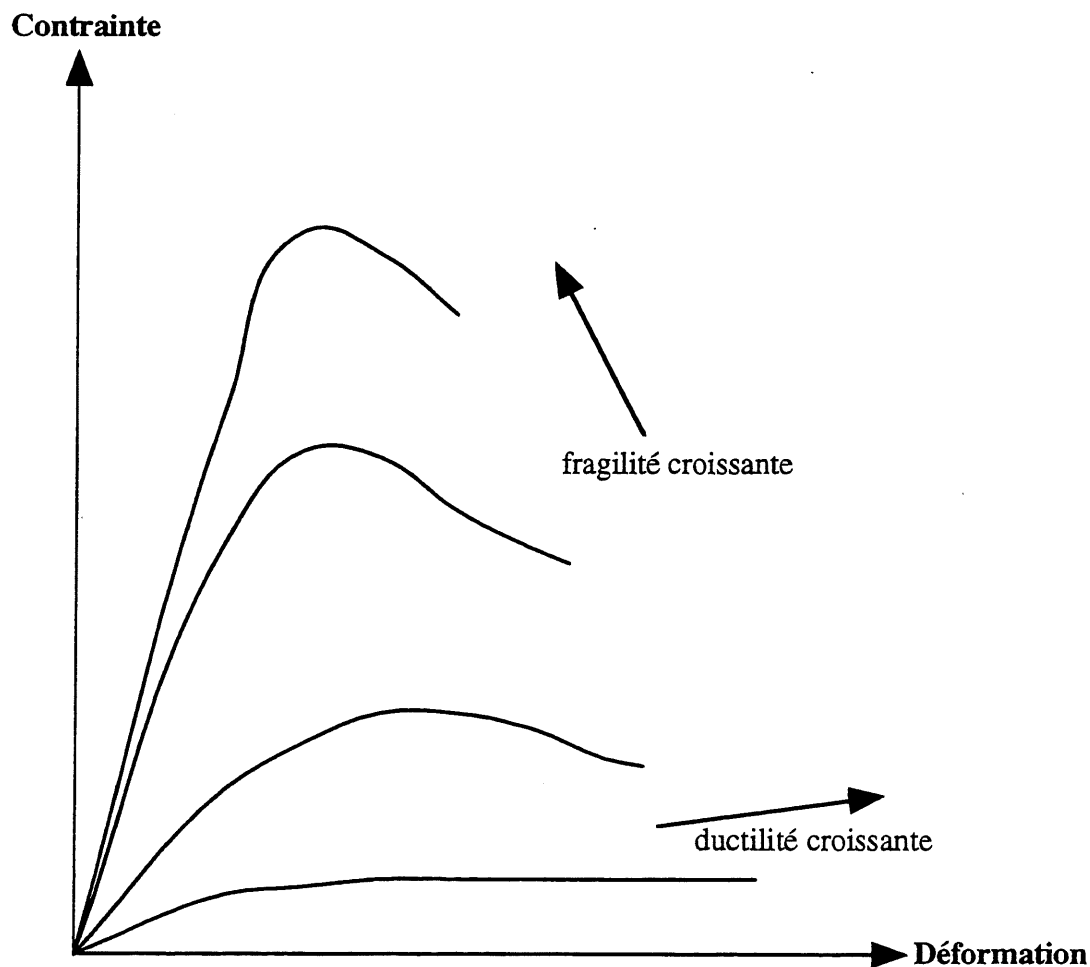


Figure 2.6 Exemples de courbes effort-déformation [GRIPPON, 1995]

c) Paramètres géomécaniques

Le module d'élasticité renseigne sur les déformations que subira la barrière et permet d'en tenir compte dans la conception des ouvrages annexes incorporés, comme un système de collecte des eaux de lixiviation.

Les valeurs obtenues par Rouis (1991) correspondent à un mélange de 90% de poussières de four de cimenterie de l'usine Alpena avec 10% de cendres volantes de type C de l'usine Saint-Clair. Les échantillons ont été préparés selon la norme ASTM C109-86, avec un rapport E/M (eau/matériau) égal à 0,4. Le mélange a été mûri à l'eau de chaux pendant 90 jours, directement après le démoulage, soit 24 heures après le malaxage et le remplissage des moules.

Les valeurs obtenues par Vincent (1993) correspondent à des poussières, sans ajout, provenant de différentes usines. Les échantillons ont été mûris pendant 7 jours en chambre humide après un compactage, à l'optimum Proctor, dans des moules cylindriques (Tableau 2.6).

TABLEAU 2.6 VALEURS DE MODULES D'ÉLASTICITÉ

	Module d'élasticité E (GPa)
Rouis (1991)	3
Vincent (1993)	0,41 à 4,35

D'après l'étude de Rouis (1991), les barrières stabilisées à base de poussières de four de l'usine Alpena et de cendres volantes de type C de l'usine Saint-Claire, mûries à l'eau, ont des résistances faibles par rapport à celles des coulis de ciment (35 à 50 MPa à 28 jours pour type 10 et 30) et des roches (200 MPa pour le marbre et 100 MPa pour le schiste). Pour des mélanges de poussières de four et de cendres volantes (dans des proportions de 10 à 30% en cendres), les valeurs de C_0 oscillent entre 0,66 et 4,18 MPa et entre 15,05 et 20,02 MPa pour les échantillons mûris 28 jours dans l'eau et à l'air respectivement [ROUIS, 1991] (Tableau 2.7).

TABLEAU 2.7 VALEURS DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

	CKD + CV (mûrissement à l'eau) [Rouis, 1991]	CKD + CV (mûrissement à l'air) [Rouis, 1991]	CKD seuls [Vincent, 1993]
Résistance à la compression C_0 (en MPa)	0,66 à 4,18	15,05 à 20,02	0,7 à 6,67

2.7 Ajouts minéraux

Les résidus industriels provenant de la combustion du charbon (cendres volantes), de la production du silicium métal ou du ferrosilicium (fumée de silice), et de la fonte dans les hauts fourneaux (laitiers de haut fourneau) sont des ajouts minéraux. Souvent, ces rebuts sont destinés aux parcs à déchet qui sont de plus en plus restreints. Une des façons de les utiliser est d'en ajouter une certaine quantité au CKD et au ciment Portland dans la fabrication du béton puisqu'ils possèdent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques qui augmentent l'effet de liant.

2.7.1 Réaction pouzzolanique

Une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux d'origine volcanique qui, une fois broyé et en présence de l'eau, réagit uniquement avec la chaux dégagée par l'hydratation du ciment pour former un composé ayant des propriétés cimentaires. Seule, la pouzzolane n'a pas de propriétés cimentaires. Il lui faut une source de calcium disponible, ce qui n'est pas nécessaire pour les liants hydrauliques. Il suffit d'ajouter de l'eau pour qu'effectivement il y ait formation de composés hydratés stables, très peu solubles dans l'eau et présentant une forte adhérence entre eux [DUCHESNE, 1993].

Le comportement bénéfique des ajouts minéraux est expliqué, entre autres, de plusieurs façons différentes, les principales hypothèses sont [DUCHESNE, 1993]:

- effet de dilution des alcalis par le remplacement d'une partie du ciment par un ajout minéral;
- diminution de perméabilité de la pâte, donc ralentissement de la diffusion des ions alcalins;
- réduction de l'alcalinité de la solution interstitielle du béton due aux réactions pouzzolaniques qui incorporent des ions alcalins;
- abaissement de la quantité de portlandite de la pâte de ciment.

En effet, plusieurs études montrent que la concentration en alcalis de la solution interstitielle diminue quand certains ajouts minéraux remplacent une partie du ciment [DUCHESNE et BÉRUBÉ, 1992]. Ceci indique qu'une partie au moins des alcalis présents dans la solution interstitielle a été incorporée dans les produits d'hydratation du mélange. En effet, la réaction permet aux ajouts minéraux de réagir avec la portlandite produite par l'hydratation du

ciment Portland pour former un silicate de calcium hydraté (CSH). Ce CSH possède un rapport calcium-silicium inférieur à celui produit par un ciment Portland standard et peut emprisonner une plus grande quantité d'alcalis [REGOURD et coll., 1981; GLASSER, 1992]. Les CSH d'un ciment Portland normal possède un rapport Ca/Si d'environ 1,8. Lorsque des laitiers de haut-fourneau ou des cendres volantes de type C remplacent une partie du ciment, le rapport Ca/Si diminue jusqu'à des valeurs de 1,4 à 1,5. Lors du remplacement du ciment par des cendres volantes de type F ou des fumées de silice, ce rapport peut descendre jusqu'à des valeurs de 1,0 [GLASSER, 1992].

La réaction avec la portlandite permet un épuisement progressif de cette source d'ions hydroxydes. Cependant, selon Glasser (1992), le pH de la solution interstitielle d'un matériau cimentaire qui ne contiendrait pas d'ions alcalis serait essentiellement contrôlé par l'équilibre entre le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le CSH et la phase aqueuse. Une réduction de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ne devrait pas affecter le pH sauf si cette phase est complètement éliminée. Le pH est essentiellement contrôlé par la concentration en ions alcalins, la portlandite libérant juste assez d'ions hydroxydes pour satisfaire l'équilibre ionique ($[\text{OH}^-] = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$).

2.7.2 Cendres volantes

Les cendres volantes proviennent de la combustion du charbon, finement broyé (houille, anthracite et parfois lignite) dans les centrales thermiques modernes. Ce sont des produits pulvérulents, de grande finesse.

Deux types principaux de cendres volantes peuvent être distingués selon la norme CAN3-A23.5-M82 et la norme ASTM C618-78 [MEHTA, 1986]:

- la première catégorie (type F) regroupe les cendres volantes à faible teneur en CaO ($<12\%$) et à des teneurs en oxyde de silicium, d'aluminium et de fer supérieures à 70%. Elles proviennent de la combustion de l'anthracite et du charbon bitumineux.
- la seconde catégorie (type C) est composée des cendres volantes à des teneurs en CaO supérieures à 12%. De plus, elles possèdent de fortes teneurs en sulfates et en alcalis. Ce type est beaucoup plus réactif que les cendres volantes du type F.

Les cendres volantes agissent d'abord physiquement par la forme et la taille de leurs particules sur la rhéologie du matériau frais, puis chimiquement par leur pouzzolanité ou leur hydraulité sur le développement des résistances mécaniques et la durabilité du matériau durci [REGOURD, 1986]. L'addition de cendres volantes au clinker entraîne une réduction de la demande en eau requise pour un affaissement donné, une augmentation de la résistance à la corrosion à des eaux agressives ou pures et au gel-dégel. Leur réactivité dépend de leurs caractéristiques granulométriques, morphologiques, chimiques et compositionnelles (phases minérales, abondance et composition du verre, teneur en imbrûlés, teneur en alcalis, etc.) [MEHTA, 1993]. En outre, cette réactivité est largement influencées par la source du charbon (type et composition), la température de combustion, le système de récupération des cendres et les autres conditions d'opération de la centrale thermique.

Selon Hobbs (1989), la réaction pouzzolanique des cendres volantes produit une réduction de l'alcalinité dans le béton due à la réaction avec le Ca(OH)_2 libre. Hobbs (1989) ajoute que les alcalis du ciment se combinent préférentiellement avec la silice réactive des cendres volantes. L'effet bénéfique du remplacement du ciment Portland par une cendre volante incluerait la substitution d'un CH soluble par un CSH stable.

En résumé, la réactivité des cendres volantes est fonction:

- de leur finesse et de leur état de surface;
- de leur composition chimique et minéralogique;
- de leur âge (les cendres récentes sont plus réactives que les cendres anciennes).

De même, la chimie des cendres volantes est variable, mais dans des proportions beaucoup moins importantes que pour les poussières de four de cimenterie. Cependant, l'âge de la centrale thermique, les conditions d'opération (au ralenti ou à plein régime) ainsi que le processus de récupération des cendres volantes affectent leurs caractéristiques chimiques et physiques.

Des travaux effectués à CANMET [MALHOTRA, 1989] illustrent quelques-uns des effets des cendres volantes sur les propriétés générales du béton frais. Dans le cadre de cette étude, onze types de cendres volantes provenant de sources très variées au Canada ont été examinés. Les propriétés chimiques de ces cendres sont présentées au tableau 2.8.

TABLEAU 2.8 PROPRIÉTÉS DE QUELQUES TYPES DE CENDRES VOLANTES CANADIENNES
[MALHOTRA, 1989]

Source de cendres volantes		Composition chimique (proportion du poids en pourcentage)												
	Type de charbon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	BaO	SO ₃	Perte au feu
1	B	47,1	23,0	20,4	1,21	1,17	0,54	3,16	0,85	0,16	0,78	0,07	0,67	2,88
2	B	44,1	21,4	26,8	1,95	0,99	0,56	2,32	0,80	0,27	0,12	0,07	0,96	0,70
3	B	35,5	12,5	44,7	1,89	0,63	0,10	1,75	0,56	0,59	0,12	0,04	0,75	0,75
4	B	38,3	12,8	39,7	4,49	0,43	0,14	1,54	0,59	1,54	0,20	0,04	1,34	0,88
5	B	45,1	22,2	15,7	3,77	0,91	0,58	1,52	0,98	0,32	0,32	0,12	1,40	9,72
6	B	48,0	21,5	10,6	6,72	0,96	0,56	0,86	0,91	0,26	0,36	0,21	0,52	6,89
7	SB	55,7	20,4	4,61	10,7	1,53	4,65	1,00	0,43	0,41	0,50	0,75	0,38	0,44
8	SB	55,6	23,1	3,48	12,3	1,21	1,67	0,50	0,64	0,13	0,56	0,47	0,30	0,29
9	SB	62,1	21,4	2,99	11,0	1,76	0,30	0,72	0,65	0,10	0,69	0,33	0,16	0,70
10	L	46,3	22,1	3,10	13,3	3,11	7,30	0,78	0,78	0,44	0,13	1,18	0,80	0,65
11	L	44,5	21,1	3,38	12,9	3,10	6,25	0,80	0,94	0,66	0,17	1,22	7,81	0,82

B :Bitumineux

SB :Sub-Bitumineux

L :Lignite

2.7.3 Ciment

Il est important de noter qu'il existe sur le marché industriel de l'Amérique du nord cinq principaux types de ciment:

- le ciment type 10 est le ciment à usage général et le plus disponible sur le marché;
- le ciment type 20 est habituellement utilisé dans des conditions où une attaque aux sulfates est modérée. Il est connu aussi pour sa chaleur d'hydratation relativement faible;
- le ciment type 30 qui se caractérise par une forte chaleur d'hydratation et un gain de résistance élevé à jeune âge. Ce type de ciment se caractérise aussi par sa granulométrie relativement fine. La rapidité de son hydratation et sa forte chaleur dégagée limitent son utilisation à des conditions particulières;
- le ciment type 40 est utilisé là où une faible chaleur d'hydratation est requise;
- le ciment type 50 est utilisé dans des conditions où une attaque aux sulfates est possible.

2.7.4 Argiles

Elles comptent parmi les constituants de la croûte terrestre et elles possèdent un ensemble de propriétés très particulières telles que:

- capacité de dispersion et de formation de colloïdes;
- capacité d'échange cationique (CEC) et anionique;
- adsorption et intercalation aisées de matières organiques et minérales;
- gonflement.

Mises en contact avec de nombreux composés chimiques, les argiles manifestent des propriétés d'adsorption et de gonflement qui peuvent être considérables [ROBERT, A. et coll., 1987].

La bentonite de structure hexagonale lamellaire montre une très forte capacité de rétention des cations polluants et la propriété de ne pas les relâcher, ou très peu. L'utilisation de la bentonite semble donc à priori un bon choix et permet d'envisager une bonne stabilité physico-chimique des mélanges à base de CKD. L'effet bénéfique de l'ajout de la bentonite sur la ductilité des barrières en poussières de four de l'usine Alpena a été démontré par Rouis (1991).

2.8 **Conception des méthodes de stabilisation des CKD**

Dans cette partie, on se propose de donner un aperçu sur les principaux résultats présentés dans la bibliographie traitant de la stabilisation des CKD et des sols, en mettant en évidence les aspects qui méritent discussion, action future et les principales conclusions.

On présentera en premier les techniques d'utilisation des CKD, et ensuite les méthodes de mise en place en chantier.

2.8.1 Techniques d'utilisation des CKD

a) Stabilisation des CKD par ajouts minéraux

Ballivy, (1987); Rouis, (1991); Vincent, (1993) ont proposé l'utilisation des poussières de four de cimenterie comme matériaux pour les barrières hydrogéologiques, et leur entreposage en carrière rocheuse.

Les auteurs ont précisé que la stabilisation de ces poussières concerne essentiellement à maîtriser les réactions d'expansion résultant de l'hydratation combinée d'éléments tels que les sulfates, l'alumine, la chaux, la silice et les alcalins (Na, K). Ces réactions d'expansion provoquent des augmentations du volume des mélanges accompagnées de fissuration polygonale intense et d'une détérioration des propriétés mécaniques et hydraulique du matériau. Elles sont dues à l'allongement par croissance cristalline de certains minéraux dits expansifs. La nature et la quantité de l'ajout minéral jouent un rôle important dans cette stabilisation. Ces auteurs ont tenté alors à comparer l'efficacité des ajouts choisis (cendres volantes et fumée de silice) et de déterminer leurs dosages respectifs.

La synthèse de l'étude [ROUIS, 1991], conduit à la recommandation pour les poussières de four de ciment d'Alpena, de trois types de mélanges:

- mélanges à 10% de cendres volantes de type C;
- mélanges aux fumées de silice avec un rapport fumée/poussière égal ou supérieur à 0,05;
- mélanges aux ajouts combinés de cendres volantes de type C et de fumée de silice avec des rapports cendres/poussières compris entre 0,1 et 0,2 et des rapports fumée de silice/cendres volantes compris entre 0,1 et 0,25.

b) Stabilisation des sols par les CKD

Il ressort de la bibliographie que des recherches ont été effectuées pour l'utilisation des CKD en combinaison avec d'autres matériaux comme la chaux, le ciment portland et les cendres volantes pour la stabilisation des sols.

Les études de Collins et Emery (1983) ont montré qu'on pouvait substituer, avec réussite, une partie de la chaux par les CKD dans les systèmes chaux-cendres volantes de sable.

Miller, Bench et Cobry (1980) ont rapporté l'utilisation des CKD et des cendres volantes dans la construction des routes.

Napierala (1983) a examiné la possibilité d'utiliser les CKD pour la stabilisation des sols sableux pour les fondations de pavage. Il a obtenu un mélange optimum de 15% de CKD ayant 5,9% de CaO libre et MgO, et 0,97% du total des alcalis ($K_2O + Na_2O$) avec une résistance en compression de 2,5 MPa à 14 jours. Seulement, aucune donnée n'a été spécifiée pour le comportement de ce système à long terme.

Baghdadi et Rahman (1990) ont étudié l'effet des CKD dans la stabilisation des dunes de sable pour la construction des autoroutes. À partir des propriétés géotechniques des différents mélanges, tels que la résistance à la compression à 7 jours, la relation densité - teneur en eau, le CBR, le gonflement et des considérations économiques, ces auteurs ont conclu que le mélange à base de 30% CKD et 75% de sable donnait les performances optimales.

McCoy et Kriner (1971) ont étudié la stabilisation des sols par des CKD. Les mélanges contenaient 3,8 et 10% de CKD. Ils ont testé différentes propriétés, à savoir, la résistance à la compression, la relation masse volumique - teneur en eau, la limite de liquidité, la limite et l'indice de plasticité. Ils ont obtenu des résultats comparables à ceux des sols stabilisés par de la chaux hydratée et du ciment Portland.

En adoptant une poussière de four de cimenterie, Zaman et coll. (1992) et Sayah (1993) ont effectué des tentatives de stabilisation d'argile gonflante. Les mélanges argile - CKD contenaient entre 5% à 40% de CKD en poids et mûris durant 56 jours. Les résultats montraient que, à l'exception de la masse volumique humide, les propriétés géotechniques des CKD-argile sont comparables à celles des sol - cendres volantes et ciment-sol.

Cette étude a montré que:

- l'addition des CKD réduit la masse volumique humide maximale des argiles alors que la teneur en eau optimale augmente;
- la résistance à la compression non confinée de l'argile naturelle augmente avec l'augmentation d'ajouts en CKD et une longue période de mûrissement;

- la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité décroît avec l'ajout des CKD et une longue période de mûrissement. Ces auteurs ont montré que $I_p = 12,1\%$ pour 56 jours et 40% de CKD comparé à $I_p = 64\%$ pour l'argile naturelle;
- le CBR est amélioré pour les échantillons mûris pendant 4 jours. Leur capacité portante augmente avec l'ajout des CKD;
- le potentiel de gonflement de l'argile naturelle a été mesuré selon la norme ASTM 4546. Ce potentiel décroît de 9% à 0% avec 25% de CKD. Le volume des vides est de 7% pour l'argile naturelle alors que les échantillons avec 25% de CKD donnent des volumes entre 1 et 2,3%;
- les résultats ont montré que la résistance à la compression est réduite d'une façon significative vis-à-vis des essais de gel-dégel.

c) Ajout des CKD dans le béton

En Libye notamment, les CKD posent un problème environnemental. El Wefati et ses collaborateurs (1990) ont essayé de concevoir du béton à faible résistance, en remplaçant partiellement le ciment Portland par des poussières. Ils ont montré qu'avec 20% de CKD, la résistance à la compression diminue de 18% et, en conséquence, l'expansion des réactions alcali-granulat se situe dans des limites acceptables.

Nicholson (1977) a étudié essentiellement des mélanges de cendres volantes, de CKD et d'aggrégats. Les mélanges optimums proposés pour différentes applications se situent dans les limites suivantes (masse sèche): 6 à 24% pour les cendres volantes, 60 à 90 pour les CKD et 4 à 16% pour les agrégats.

Pour les CKD- cendres volantes - aggrégats, Collins et Emery (1983) ont signalé que si les sulfates sont supérieurs à 10% dans les CKD, la durabilité contre le gel-dégel sera très faible.

2.8.2 Méthodes de mise en place en chantier

Des essais in-situ [TODRES, 1992] ont été effectués pour déterminer si les poussières de four sont compactables afin de déterminer les perméabilités associées aux divers degrés de

compaction. Les échantillons compactés sur le site ont montré une relation inverse entre la masse volumique et la perméabilité. Il faut noter que cette étude a été faite avec une poussière de four de cimenterie contenant 1,7% de chaux libre.

Robert et coll. (1994) ont fait une étude d'ingénierie pour déterminer si des pratiques alternatives de gestion, spécifiques à un site donné, sont des solutions viables. Il est à noter que ce qu'ils ont présenté concerne une barrière en matériaux synthétiques enveloppant les CKD. Néanmoins, cette étude illustre les paramètres de design et d'opération qui ont été identifiés comme ceux indiquant que des sites d'enfouissement contenant uniquement des poussières de four ne laisseront pas s'échapper de lixiviats durant la vie active et durant une période de 30 ans après la fermeture d'une unité de gestion de poussières de four.

Pour une meilleure efficacité, une analyse semble nécessaire afin d'établir une méthode de construction fiable pour les matériaux CKD et d'un autre côté, même si les membranes sont bien construites, il arrive que des conditions d'exploitation particulières entraînent des déformations de la membrane. Ainsi, pour des usines situées dans des régions nordiques, une partie de la membrane située près de la crête des digues est soumise à l'effet du gel. L'examen de plusieurs étangs au printemps 1989 [LEROUEIL, 1990] a permis de mettre en évidence des fissures allant jusqu'à plusieurs centimètres de largeur apparaissant en crête des digues.

Daniel (1984), Day et Daniel (1985), Elsbury et coll. (1990), Leroueil et coll. (1990) et Bouchard et coll. (1991) ont présenté les problèmes d'imperméabilisation des étangs rencontrés et des cas où la technique n'a pas donné les résultats escomptés. Par ailleurs, dans la pratique courante on cherche fréquemment à former une barrière en oubliant ou en minimisant le rôle important joué par les modes de mise en place, la teneur en eau, l'épaisseur des couches, l'énergie de compactage, le matériel utilisé, etc. Alors que la performance réelle d'étanchéité sur le site, nonobstant les qualités propres des matériaux utilisés, dépendra largement du soin apporté à la construction. À cet égard, la mise en place joue un rôle déterminant. Il est important d'analyser et de comprendre chaque méthode de mise en place afin d'établir des méthodes fiables pour la conception et la mise en place des CKD.

2.9 Synthèse

L'étude bibliographique relative à la réutilisation des CKD montre que les essais ont été effectués sur un nombre limité de types de sol. Pour compléter la recherche, il est nécessaire de considérer d'autres types de sol et d'argile afin de prouver l'efficacité des CKD en tant que stabilisateurs. Ce qui serait pratique et économique, c'est le choix des zones d'emprunt de sols proches des usines de ciment produisant des CKD.

Les études doivent inclure les tests de perméabilité sur des échantillons dont l'hydratation est complète. Une forte perméabilité est demandée pour le drainage alors qu'une faible perméabilité est requise pour l'étanchéité.

Pour bien comprendre le mécanisme de stabilisation, les analyses minéralogiques doivent être effectuées pour différentes périodes de mûrissement et différents ajouts en CKD.

La durabilité des CKD-sols stabilisés doit être évaluée en utilisant des tests de gel-dégel et de mouillage-séchage qui relatent les conditions réelles in situ.

Le développement de données sur l'efficacité relative des différents ajouts de stabilisation est importante. Les propriétés physiques, chimiques, géotechniques des CKD-sol, chaux-cendres volantes-agrégats, etc. doivent être comparées entre elles. Ceci aidera à la compréhension du mécanisme général de stabilisation.

Les recommandations proposées jusqu'à maintenant reposent sur un seul type de poussière (cimenterie Alpena) et ne pourraient s'appliquer à toutes les cimenteries. La stabilisation des CKD demande la connaissance de leur variabilité chimique.

Une investigation sur la stabilisation et la consolidation des poussières de four de cimenterie ne peut se faire sans une connaissance élargie des propriétés physico-chimiques des produits considérés.

Si les résultats en laboratoire fournissent de bonnes performances pour les CKD, des tests de chantier doivent être conduits pour évaluer les performances réelles de ces CKD. De telles études seraient utiles pour formuler les procédures de conception et de recommandations pour les applications des CKD dans la stabilisation des sols et dans la construction des autoroutes. Les études proposées peuvent, ainsi, aider à développer les grandes lignes pour l'application des CKD dans la stabilisation des sols et la réalisation de barrières environnementales. En effet, malgré la multiplicité des domaines de réutilisation étudiés, un nombre de recherches limité a été réalisé pour étudier la possibilité d'utilisation des poussières de four stabilisées comme barrière de recouvrement, d'étanchéité ou de traitement dans les sites de stockage et d'enfouissement des déchets

3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente les objectifs du sujet de recherche, la méthodologie développée, les techniques d'essai ainsi que les analyses effectuées.

3.1 Objectifs de l'étude

Le présent sujet de recherche, d'un intérêt pratique, a les objectifs suivants:

- le développement d'une méthodologie de stabilisation des CKD par la technique d'ajouts minéraux;
- la détermination des critères de performance géochimiques, mécaniques, hydrauliques et de durabilité des barrières de recouvrement, d'étanchéité, ou de traitement de masse;
- l'évaluation des performances réelles des mélanges retenus;
- l'élaboration d'un guide de mise en place et de contrôle du site.

Malgré la multiplicité des domaines de réutilisation étudiés, un nombre de recherches limité [ROUIS, 1991] a été réalisé pour étudier la possibilité d'utilisation des poussières de four stabilisées comme barrière hydrogéologique dans les sites de stockage et d'enfouissement des déchets. Néanmoins, il faut noter que:

- les recommandations reposent sur une seule sorte de poussière qui est celle d'Alpena;
- la vérification des possibilités d'utilisation du matériau stabilisé comme organe d'étanchéité ne tient pas compte de la génération de la chaleur lors de l'hydratation de ces matériaux;
- l'évaluation des performances réelles des mélanges a minimisé le rôle important joué par l'effet d'échelle et la mise en place.

Cependant, la méthodologie pour la stabilisation des CKD par la technique d'ajouts minéraux au chantier est absente des études antérieures. Une fois qu'on a défini au laboratoire le type de mélange approprié, sa méthode de préparation et la maîtrise de la réaction d'expansion, la prochaine étape consiste essentiellement à déterminer le mode de transport et de mise en place, l'évaluation d'effet d'échelle sur les caractéristiques géotechniques en tenant compte des conditions environnementales du chantier.

3.2 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail se divise en trois phases:

Étape 1: Choix et variabilité des CKD;

Étape 2: Optimisation des mélanges et critères de performance;

Étape 3: Essais pilotes en chantier;

La figure 3.1 illustre le cheminement expérimental incluant les essais pertinents à prendre en considération pour mener à bien cette étude.

Un complément d'information, plus détaillé, vient étayer ce cheminement en y incorporant les interactions entre les différents volets principaux considérés (Figure 3.2). Ce qui permettra d'apporter, si nécessaire, des modifications pour les volets subséquents.

3.3 Variabilité chimique des CKD

Pour répondre à cette demande, des investigations ont été réalisées en mettant à profit différentes techniques expérimentales et les approches qui en découle serviront à établir:

- la constitution d'une banque de données sur les composantes physico-chimiques des CKD;
- l'élaboration de diagrammes ternaires des poussières concernées par l'étude. Ce qui limitera le domaine d'existence des CKD;
- le choix des ajouts minéraux pour la stabilisation de ces poussières.

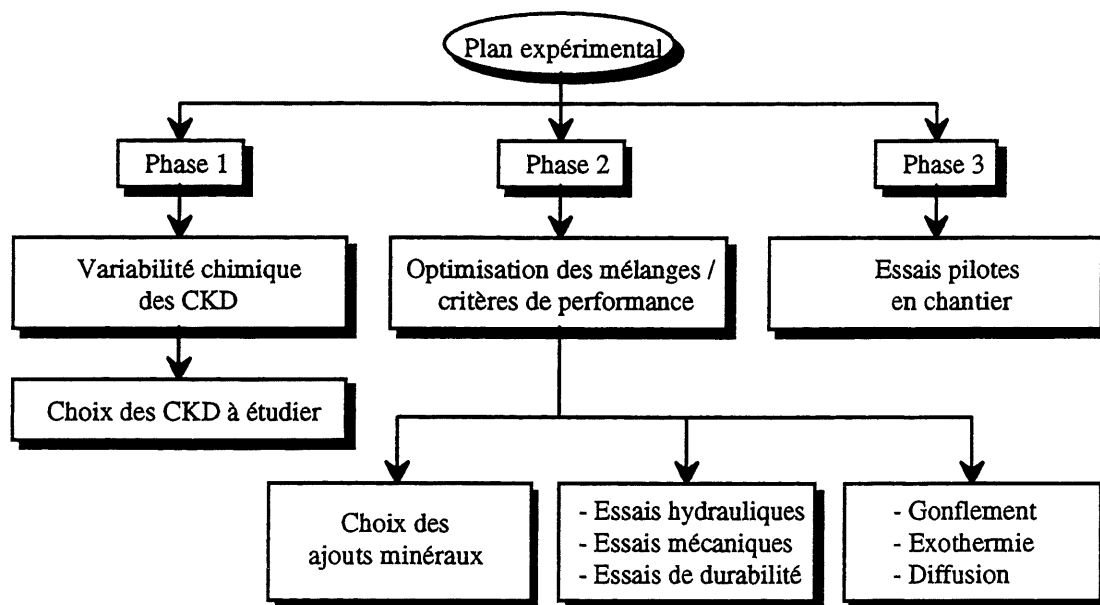


Figure 3.1 Programme expérimental

Ce volet est mené selon les étapes suivantes :

- la collecte de données chimiques et physiques des poussières concernées par l'étude à savoir: Alpena5, Alpena6, Exshaw4, Exshaw5 et Brookfield;
- l'analyse statistique de la variabilité chimique des CKD;

- la détermination des éléments susceptibles de contrôler la prépondérance de l'action expansive sur l'effet pouzzolanique ou vice-versa;
- l'établissement d'une liste d'ajouts minéraux sur la base des résultats de la variabilité combinés à des résultats d'expériences réalisées avec certains additifs bruts.

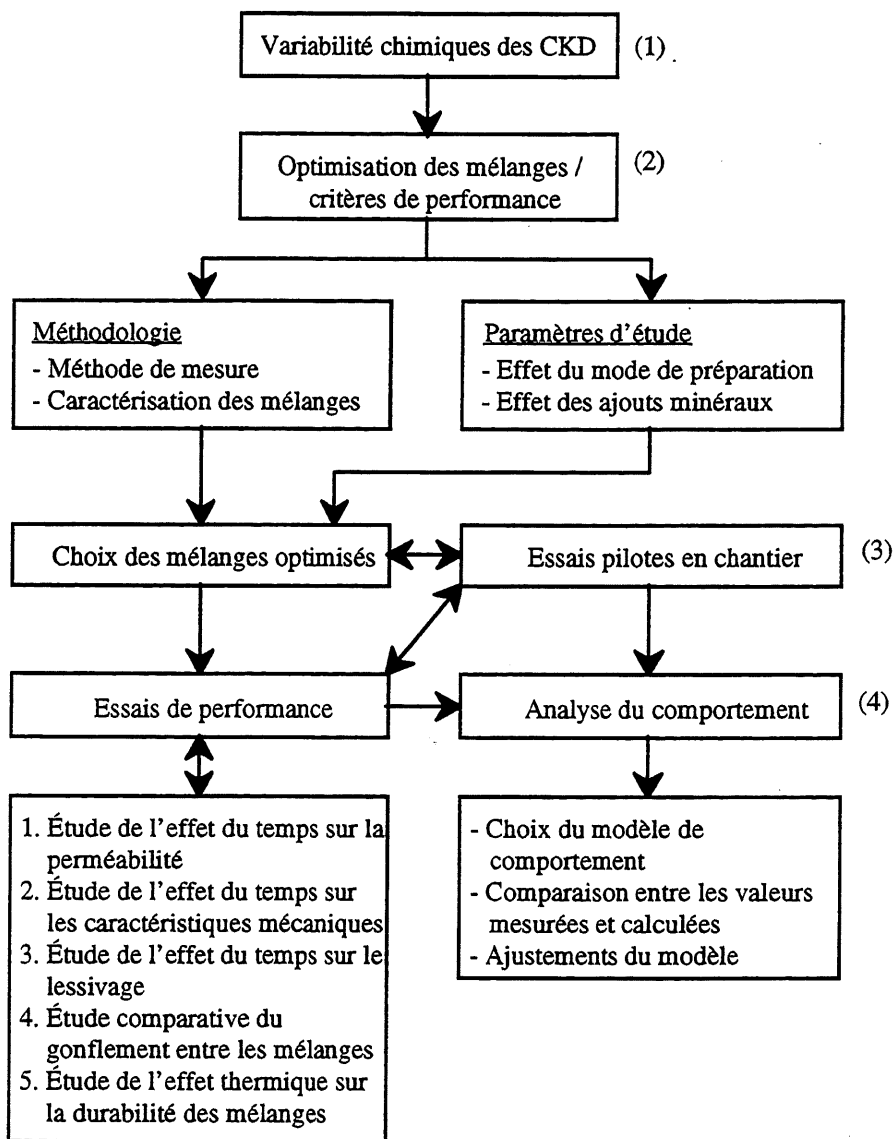


Figure 3.2 Plan de travail

3.4 Optimisation des mélanges / critères de performance

Les objectifs visés par cette partie visent principalement les points suivants:

- déterminer l'aptitude au compactage des différentes poussières avec ou sans ajouts minéraux et définir les teneurs en eau optimales pour leur mise en place en tant que barrière ou en masse;
- évaluer leurs caractéristiques mécaniques en tout temps avec les densités des échantillons;
- déterminer leur perméabilité à l'eau en différents points de la courbe masse volumique-teneur en eau et en fonction du temps;
- évaluer leurs comportements aux variations thermiques;
- déterminer leur résistance au lessivage afin d'évaluer leurs degrés de pollution.

Cette partie permettra de définir les teneurs en eau et d'ajouts minéraux, optimales pour atteindre les meilleures caractéristiques hydrauliques, mécaniques et géochimiques. L'analyse globale du comportement des mélanges permettra d'établir certaines lois concernant le gonflement, l'exothermie et la diffusion dans les barrières réalisées. Ces résultats serviront de référence lors de la mise en place sur le chantier.

L'efficacité environnementale de la barrière est évaluée en terme de concentration de contaminants qui la traversent en fonction des trois paramètres suivants:

- la nature et les caractéristiques hydrauliques de la barrière;
- l'épaisseur de la barrière;
- le temps de fonctionnement du site.

La prédiction qualitative et quantitative de la migration des contaminants vise principalement deux objectifs: l'identification du mode de transport et le choix de l'épaisseur de la barrière. La détermination des coefficients de diffusion des barrières développées est effectuée par des essais de migration de contaminants supposés inertes réalisés sur des modèles réduits expérimentaux au laboratoire (Figure 3.3).

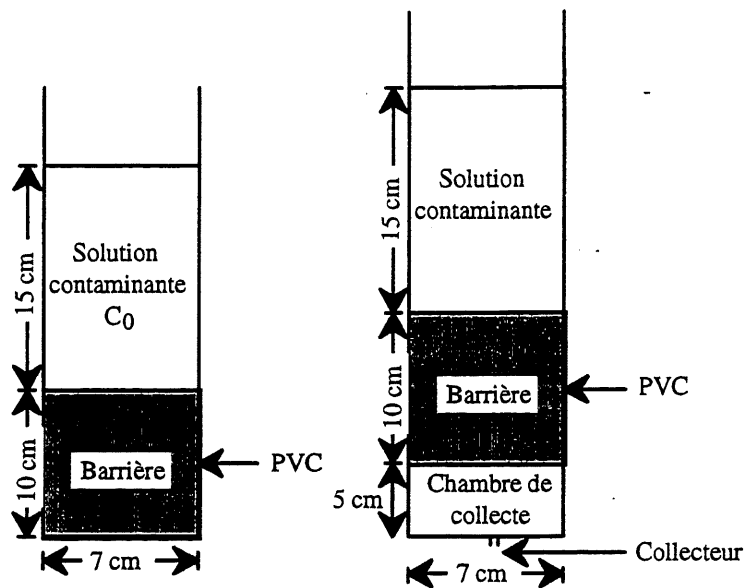


Figure 3.3 Dispositifs de simulation de la migration des contaminants a) par diffusion et b) par diffusion-advection

3.4.1 Critères de performance

Dans l'étude des barrières d'étanchéité des sites d'entreposage, il est nécessaire de se fixer des valeurs dans le but de connaître les critères de performance à atteindre pour des mélanges de poussières de four de cimenterie et d'ajouts minéraux (voir section 2.4).

3.4.2 Mélanges à préparer

Dans un premier temps, le comportement des poussières de four de cimenterie sans ajout a été étudié. Dans un deuxième temps, une stabilisation à l'aide d'ajouts minéraux est envisageable si l'expérience démontre sans ambiguïté la nécessité.

La préparation des échantillons fait intervenir plusieurs séries d'essais qui diffèrent par:

- les matériaux utilisés;
- la préparation avant le compactage;
- le temps de malaxage;
- le temps entre le malaxage et le compactage;
- le temps de mûrissement entre le compactage et les essais.

Il est à noter que cette préparation des échantillons est basée sur la variation du pourcentage de CKD et des ajouts minéraux dans le mélange.

Pour chaque poussière choisie, 4 séries d'échantillons sont préparés à partir des CKD et d'ajouts minéraux:

- la première série a permis de choisir la méthode de préparation des échantillons (remblayage hydraulique, proctor normal, proctor modifié);
- la deuxième série a permis l'étude du comportement au compactage des CKD sans ajouts minéraux;
- la troisième série a servi à vérifier et à fixer le mode de mûrissement à adopter pour la suite des expériences;
- la quatrième série a pour vocation l'étude de l'influence du pourcentage des ajouts minéraux sur les propriétés géotechniques (hydrauliques, mécaniques, géochimiques) et sur la résistance aux variations thermiques.

3.5 Essais pilotes en chantier

Une fois défini le type de mélange approprié et sa méthode de préparation, la prochaine étape consiste essentiellement à déterminer le mode de transport et de mise en place, en tenant compte des conditions environnementales des chantiers. Pour ce faire, des planches d'essais sont édifiées et dotées de moyens de suivi (thermomètre, jauges de déformation, repères pour le suivi du gonflement, collecteur de lixiviat, etc.). Chaque planche a fait l'objet d'une caractérisation au temps zéro et les mêmes paramètres que ceux identifiés pour la caractérisation initiale sont analysés. Les mesures sont prises selon des fréquences indiquées.

Selon les résultats obtenus en laboratoire et sur les cellules de démonstration, un guide de mise en place et de contrôle est élaboré afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage sur le site.

Ce guide permettra de simuler au mieux les différentes phases requises depuis le malaxage jusqu'au compactage, pendant la mise en place des poussières en tenant compte de certains paramètres de mise en œuvre :

- la cadence de mise en place;
- l'épaisseur des couches à compacter;
- la longueur minimale de bande à compacter;
- la teneur en eau de compactage;
- les moyens matériels et humains mis en œuvre;
- les moyens de contrôle de la qualité.

3.6 Techniques d'essai et d'analyse

3.6.1 Propriétés texturales

a) Granulométrie

La répartition granulométrique est réalisée à l'aide d'un appareil à canaux multiples de marque "Coulter Multisizer II" ou par sédimentométrie.

b) Surface spécifique

Les surfaces spécifiques sont mesurées par volumétrie faisant appel à l'azote liquide comme physisorbat. Cette technique est basée sur la méthode BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938).

c) Masse volumique

La masse volumique est réalisée par pycnométrie (ASTM C188-84). Cet essai consiste en l'utilisation d'un vase gradué Le Chatelier avec des prises de volumes à température constante (20 °C).

d) Porosité

L'analyse de la microstructure au porosimètre à mercure permet de détecter les variations de porosité et la distribution des vides dans les échantillons de barrières expérimentales et au cours du mûrissement, avant et après le lessivage à l'eau. Le principe de l'essai de porosimétrie au mercure est décrit par Moukwa (1988).

3.6.2 Caractéristiques microstructurales

a) Analyse par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X sert à caractériser les phases cristallines présentes dans un échantillon à l'aide d'un faisceau monochromatique utilisant la radiation $K\alpha$ du cuivre avec une longueur d'onde $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$.

b) Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique permet d'avoir des informations sur l'évolution des masses en fonction du temps et de la température. L'analyse thermique différentielle constitue un outil supplémentaire puisqu'elle permet de déceler l'ensemble des phénomènes thermiques pouvant accompagner une perte ou un gain de poids ainsi que les accidents reliés à des transformations allotropiques.

c) Analyse par microscopie électronique à balayage

L'analyse au microscope électronique à balayage permet la description de la microstructure des mélanges réalisés pour l'étude de la stabilisation des poussières ainsi que du comportement des différentes phases minérales au sein d'un même mélange ou dans des mélanges différents.

3.6.3 Mesures du comportement des mélanges avec l'eau

a) Compactage

Les poussières sont compactées selon la norme ASTM D698-78. Cet essai Proctor normalisé est choisi car il est parmi ceux qui se rapprochent le plus des compactages effectués sur le terrain. Une question se pose cependant quant à l'homogénéité du matériau compacté dans le moule. En effet, les couches inférieures reçoivent, en plus de leur compactage propre, une partie de l'énergie fournie lors du compactage des couches supérieures. Ceci peut influencer leur densité. Afin de minimiser ce problème, les éprouvettes prélevées pour les essais ont la même longueur que l'échantillon. Après le compactage, une attention particulière est portée sur les périodes de mûrissement des échantillons destinés aux essais hydrauliques, diffusion et mécanique.

b) Temps de prise initiale ou finale

Une fois compactées et selon leur composition minéralogique, certaines poussières montrent une forte tendance à durcir. Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil Vicat utilisé pour les ciments (ASTM C191-71)

c) Gonflement

- Gonflement à l'air humide ou à l'eau

Les mesures de gonflement à l'air humide ou à l'eau sont effectuées sur des échantillons préparés, à différentes teneurs en eau et à différentes masses volumiques dans des moules cylindriques rigides de 52 mm de diamètre. Le moule à paroi rigide empêche toute déformation latérale et exerce donc un confinement dans cette direction. On mesure les variations de hauteur de l'échantillon à l'aide d'un comparateur jusqu'à stabilisation (Figure 3.4). Un thermocouple est installé au coeur de l'échantillon. À chaque lecture de variation de hauteur, correspond une prise de température.

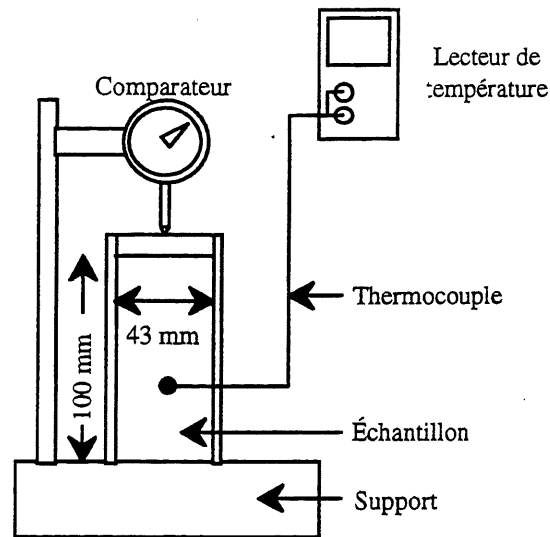


Figure 3.4 Gonflement à l'air humide ou à l'eau [RHOUZLANE, 1996]

- Gonflement à l'eau

L'échantillon est compacté à l'énergie Proctor modifiée dans un moule CBR. Le moule est placé dans une cuvette d'eau pour simuler la proximité de la nappe d'eau souterraine. Une plaque perforée, permettant l'évaporation de l'eau, est placée sur l'échantillon ainsi qu'une masse de 10 lbs (équivalente à environ 2,5 kPa). Un extensomètre type LVDT relié à un système d'acquisition, et installé sur la plaque assure le suivi de l'expansion de l'échantillon (Figure 3.5).

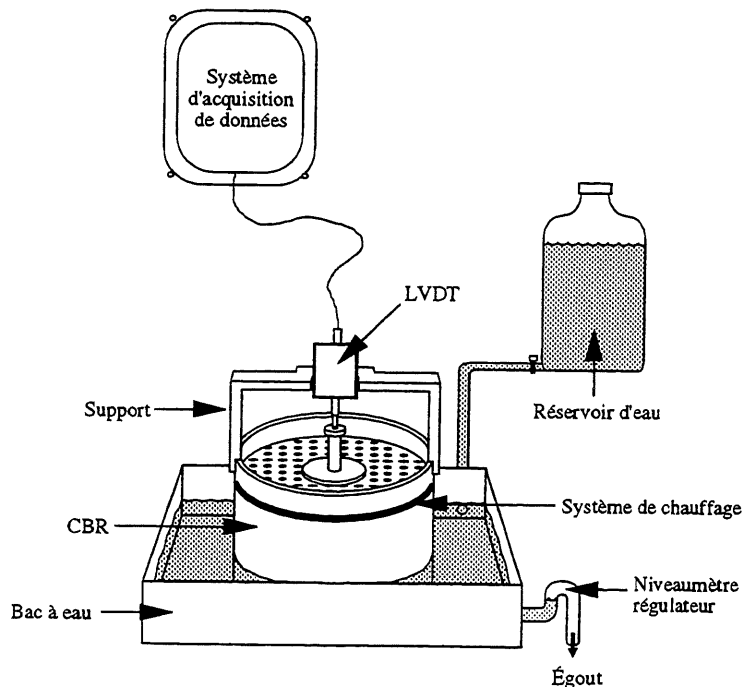


Figure 3.5 Gonflement à l'eau

d) Essai de gel-dégel

La méthode permettant de mesurer la résistance à l'altération par gel-dégel est une adaptation du *Test for resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* (ASTM C666-80) et des *Freezing and Thawing Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures* (ASTM D560-57). Elle a été normalisée sous l'appellation de méthode ASTM D4843.

3.6.4 Mesures mécaniques

a) Mesures ultrasoniques

On effectue des mesures de propagation d'ultrasons à travers des échantillons destinés à l'étude des propriétés mécaniques. On peut suivre de façon non destructive et continue, la cinétique d'hydratation des échantillons par l'essai ultrasonique.

Les capteurs sont de type piézométrique, sensibles aux ondes longitudinales (L) de traction-compression et aux ondes transversales (T) de cisaillement. La fréquence d'émission est choisie à 250 Hz afin d'obtenir la sensibilité maximale des capteurs.

Les ondes longitudinales et transversales qui se propagent à la vitesse V_L et V_T sont fonctions du matériau. Elles peuvent permettre l'accession au module dynamique ou coefficient de Poisson. De plus, l'essai peut renseigner sur l'état d'avancement de la fissuration, notamment au moyen de l'indice de continuité.

b) Résistance à la compression simple (C_0)

La résistance à la compression simple exprime la charge uniaxiale que peut supporter un matériau. Les mesures sont effectuées soit sur des échantillons cubiques sur une presse RIEHLE de 30 000 kN de capacité, soit sur des échantillons cylindriques sur une presse MTS asservie d'une capacité de 3 000 kN. Les essais sont réalisés selon la norme ASTM C109-86.

c) Module d'élasticité (E)

Le module d'élasticité est exprimé par l'équation 3-1:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3-1)$$

où E : module d'élasticité (MPa)
 σ : contrainte axiale appliquée (MPa)
 ϵ : déformation axiale (%)

Cet essai est réalisé sur une presse MTS asservie et munie d'un système d'acquisition automatique de données. La préparation des échantillons, le déroulement des essais et l'interprétation des résultats ont été effectués selon la norme ASTM D3148-86.

d) Résistance à la traction

La résistance à la traction est déterminée de façon indirecte par des essais de compression diamétrale connus sous le nom d'«essais brésiliens» (ASTM D3967-87).

La résistance à la traction T_0 est donnée par la relation:

$$T_0 = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3-2)$$

où T_0 : résistance à la traction (MPa)
 P : charge à la rupture (N)
 L : longueur de l'échantillon (mm)
 D : diamètre de l'échantillon (mm)

Ces essais sont réalisés sur une presse RIEHLE d'une capacité de 3 000 kN.

e) Essai de compression triaxiale

Cet essai sert à déterminer la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ). Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D2664-86.

3.6.5 Mesures de perméabilité

Les mesures de perméabilité effectuées pour la caractérisation de l'étanchéité des mélanges développés sont réalisées sur deux types de perméamètres selon le comportement de ces mélanges.

Le perméamètre de type Bernaix modifié conçu à l'Université de Sherbrooke [NIEMANTS, 1981] permet la mesure de la perméabilité sur des échantillons cylindriques de 52 mm de diamètre environ par une circulation radiale d'eau en écoulement convergent ou divergent sous l'effet d'un différentiel de pression pouvant atteindre 2,1 MPa. La description détaillée de ce type de perméamètre et de son mode de fonctionnement est détaillée par Niemans et Ballivy [NIEMANS, 1981].

La cellule triaxiale conçue et réalisée au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée est présentée à l'annexe 4.

3.6.6 Résistance au lessivage

a) Essai de lixiviation TCLP de l'EPA

Cet essai consiste à déterminer la teneur des éléments lixiviables à partir d'une procédure décrite par l'EPA et désignée TCLP. Les consignes d'utilisation et de l'assurance qualité sont données par EPA (1993).

b) Lessivage au perméamètre

Les burettes des perméamètres sont équipées de valves qui permettent de recueillir l'eau percolant à travers les échantillons. Suivant le débit de percolation, cette quantité ne peut être récoltée journalièrement sur tous les échantillons. Lors du traitement des données, on corrige l'effet de la dilution par le volume mort d'eau entourant l'échantillon comme décrit par Colin (1990). Les concentrations ne sont pas forcément homogènes dans le volume mort car il existe un gradient de concentration entre le haut et le bas de la cellule. Les échantillons sont prélevés par le haut.

c) Analyse chimique des eaux de circulation

Le but est de déterminer les divers agents solubles des échantillons et leur concentration dans les eaux de lixiviation ainsi que son évolution dans le temps.

Divers types d'analyses physico-chimiques sont réalisés sur des échantillons d'eau de percolation prélevés à la sortie des perméamètres. Ces analyses sont effectuées sur des échantillons pour la vérification des résultats de l'étude de stabilisation, pour l'étude de la longévité et pour la vérification de l'efficacité de certaines barrières développées.

3.6.7 Essais et travaux de contrôle in situ

Une campagne d'investigation (in situ et en laboratoire) est effectuée avant et après l'hiver afin de dégager l'effet des conditions environnementales sévères sur les performances réelles des matériaux développés.

a) Campagne d'investigation in situ

Les conditions de mise en place sont contrôlées in situ par:

- mesures de densités en place par la méthode du cône de sable (norme CAN/BNQ 2501-060-M-86) et le gamma-densimètre;
- mesures des teneurs en eau du matériau lors du malaxage par séchage (norme CAN/BNQ 2501-170-M-86);
- contrôle de l'homogénéité du mélange après malaxage par prélèvement d'échantillons;

- mesures de la résistance à la compression par le pénétromètre de poche;
- prélèvement de carottes qui vont servir à la caractérisation au laboratoire (avant et après l'hiver);
- analyse des lixiviats récupérés par le système de collecte;
- mesure de la perméabilité in-situ: le contrôle de la perméabilité in situ se fera directement à partir des mesures dans les lanternes (avant et après l'hiver);
- suivi en fonction du temps des vitesses soniques dans les cellules de démonstration par la méthode *Cross hold*;
- tranchées d'inspection permettant un examen détaillé des surfaces de reprise;
- suivi de l'évolution des températures à l'aide de thermocouples reliés à un système d'acquisition de données installés sur les profils vertical et horizontal des digues;
- suivi des mouvements des planches par un ensemble de repères de nivellement placé sur la crête et les talus des cellules de démonstration;
- suivi des mouvements des planches par un ensemble de jauges de déformations;

b) Campagne d'investigation en laboratoire

Les échantillons prélevés par carottage sur toute l'épaisseur de la couche compactée faisant l'objet de caractérisation en laboratoire:

- propriétés physiques des échantillons (masse volumique, porosité, etc.);
- propriétés minéralogiques en mettant à profit la diffraction des rayons X et l'analyse thermogravimétrique;
- propriétés hydrauliques;
- propriété chimique des eaux de lixiviation collectées à la sortie du perméamètre;
- caractéristiques mécaniques (C_0 , T_0 , E , ν , etc.);
- caractéristiques soniques (E_{dyn} , ν_{dyn} , etc.).

4 OPTIMISATION DES MÉLANGES

4.1 Caractérisation des CKD

Cette section présente une caractérisation des matériaux qui ont servi à l'étude. Étant des résidus industriels, susceptibles de présenter une variation dans le temps et dans l'espace, une banque de données sur les composantes physico-chimiques a été constituée. Celle-ci a été complétée par l'élaboration des diagrammes ternaires des poussières de four de cimenterie concernées par l'étude et la définition de certains ajouts minéraux pour la stabilisation des poussières.

4.1.1 Propriétés chimiques des CKD

Le tableau 4.1 décrit en général la composition chimique des CKD [Miller, 1980]. La composition chimique de ces poussières se distingue, de façon générale, par sa richesse en alcalins (sodium et potassium), en chlorures et en sulfates.

Une classification de ces poussières a été proposée sur la base des teneurs en ces trois éléments [BHATTY, 1985]:

- le type S: alcalis et chlorures faibles, sulfates modérés;
- le type H: alcalis et chlorures faibles, sulfates élevés;
- le type L: alcalis et chlorures faibles, sulfates faibles.

TABLEAU 4.1 INTERVALLE DE LA VARIATION CHIMIQUE DES CKD [MILLER, 1980]

Phases	Pourcentage		
	Faible	Moyen	Élevé
SiO ₂	6,0	16,5	28,5
Al ₂ O ₃	3,2	4,4	9,6
Fe ₂ O ₃	0,8	2,7	5,9
CaO			
De 9 sources	16,0	47,6	65,0
De 13 sources	8,3	12,6	20,2
MgO	0,8	2,3	4,8
SO ₃	0,7	7,1	26,3
Na ₂ O	0,1	0,8	3,2
K ₂ O	1,1	5,5	26,2
Perte au feu	2,5	16,0	32,0

Le tableau 4.2 donne une analyse chimique moyenne réalisée à partir de 103 spécimens récoltés par le "US Bureau of Mines" en 1980 [CPCA, 1992].

TABLEAU 4.2 ANALYSE CHIMIQUE MOYENNE DES CKD [CPCA, 1992]

Composés	Pourcentage massique
CaCO ₃	55,5
SiO ₂	13,6
CaO	8,1
K ₂ SO ₄	5,9
CaSO ₄	5,2
Al ₂ O ₃	4,5
Fe ₂ O ₃	2,1
KCl	1,4
MgO	1,3
Na ₂ SO ₄	1,3
KF	0,4
Autres	0,7
Total	100,0

Todres, Mishulovich et Ahmed (1992) ont sélectionné trois poussières de four de cimenterie (Tableau 4.3) pour étudier leur composition chimique et leurs caractéristiques physiques. Ces données ne pourraient s'appliquer dans le cadre de cette étude. La stabilisation des CKD demande la connaissance de leur variabilité chimique.

TABLEAU 4.3 COMPOSITION CHIMIQUE DES CKD [TODRES et coll., 1992]

Composé	Poussière G	Poussière H	Poussière S
SiO ₂	15,02	9,64	15,23
Al ₂ O ₃	3,85	3,39	3,07
Fe ₂ O ₃	1,88	1,10	2,00
CaO	41,01	44,91	61,28
MgO	1,47	1,29	2,13
SO ₃	6,27	6,74	8,67
Na ₂ O	0,74	0,27	0,34
K ₂ O	2,57	2,40	2,51
TiO ₂	0,36	0,18	0,17
P ₂ O ₅	0,02	0,00	0,10
Mn ₂ O ₃	0,05	0,01	0,01
SrO	0,04	0,01	0,03
LOI	25,78	30,24	4,45
CaO libre	0,85	0,52	27,18

En effet, il convient de rappeler qu'en matière d'ajout minéral et de CKD, il est très difficile de généraliser. On peut certes établir des sous-classes dans le cas de chacun des ajouts minéraux qui permettent de prévoir certains des effets de ces ajouts sur les CKD, mais il faut se rappeler que seuls des essais effectués avec des CKD avec lesquels ces ajouts minéraux seront utilisés demeurent encore la façon la plus valable d'évaluer leur efficacité. On s'est rendu compte qu'une analyse chimique des CKD, avec lesquels on réalise nos expériences, échantillonnées sur une année, s'avère nécessaire. Après avoir homogénéisé les barils considérés, des échantillons ont été prélevés. Leur analyse chimique est présentée dans l'annexe 3.

Le tableau 4.4 présente la moyenne, l'écart-type et l'intervalle de variation de chaque composante chimique de chacune des poussières.

L'annexe 3 résume la variabilité chimique de la poussière d'Alpena étalée sur 3 ans.

L'analyse des valeurs reportées dans ce dernier tableau ainsi qu'à l'annexe 3 montre que la teneur en silice totale varie entre 12 et 15% et ce quelle que soit l'origine de l'échantillon. Les écart-types relevés oscillent entre 0,2 et 1,0.

Au contraire, la chaux manifeste un domaine plus large où la composition est située entre 38 et 57%. Ce qui correspond à un écart-type évalué entre 1,0 et 5,6. Le dépouillement des résultats semble confirmer que cette variabilité est directement liée à la variation de la chaux libre.

La concordance des valeurs des ions sulfates et ceux relatives à la somme des alcalins laisse penser à un certain équilibre stoechiométrique permettant la présence de ces ions sous forme de sulfates alcalins.

Hormis deux analyses, l'oxyde ferrique présente une certaine régularité puisque son domaine d'existence est très peu étalé, 1,3 à 1,8%.

TABLEAU 4.4 VARIABILITÉ CHIMIQUE DES CKD

	Alpena 5			Alpena 6			Bath		
	Moyenne	Écart-type	Intervalle	Moyenne	Écart-type	Intervalle	Moyenne	Écart-type	Intervalle
SiO ₂	14,30	0,22	14,04-14,54	14,11	0,61	13,88-16,06	14,58	0,84	13,98-15,30
Al ₂ O ₃	3,78	0,43	3,47-4,09	3,78	0,37	3,61-4,06	3,76	0,30	3,52-3,97
TiO ₂	0,18	0,01	0,17-0,19	0,43	0,25	0,25-0,64	0,18	0,01	0,17-0,19
P ₂ O ₅	0,07	0,01	0,05-0,07	0,07	0,01	0,05-0,07	0,08	0,02	0,08-0,09
Fe ₂ O ₃	1,79	0,05	1,73-1,83	1,74	0,04	1,71-1,88	1,35	0,05	1,31-1,35
CaO	48,64	5,60	44,00-52,60	46,53	2,37	44,23-52,10	38,99	0,98	38,29-39,92
MgO	1,28	0,26	1,09-1,46	1,22	0,23	1,06-1,48	1,33	0,20	1,18-1,47
Na ₂ O	0,22	1,10	0,15-0,30	0,29	0,07	0,24-0,37	0,34	0,09	0,25-0,40
K ₂ O	3,37	1,08	2,60-4,13	4,63	0,97	3,93-5,31	3,88	1,05	2,89-4,54
SO ₃	15,31	1,63	8,75-17,00	14,74	1,07	13,83-15,50	3,24	1,24	2,36-4,12
LOI	9,75	4,00	6,92-17,05	11,40	1,58	6,11-12,51	33,05	0,59	32,63-33,67
Total	99,2	2,12		98,96	1,00		100,71	0,47	
CL	0,32	0,05	0,25-0,33	0,98	0,28	0,57-0,98	0,92	0,09	0,79-0,92
f CaO	17,89	5,95	12,99-22,03	14,09	0,59	13,67-22,10	0,19	0,09	0,01-0,45

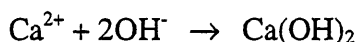
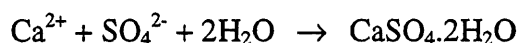
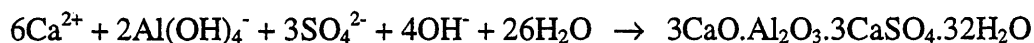
	Brookfield			Exshaw 4			Exshaw 5		
	Moyenne	Écart-type	Intervalle	Moyenne	Écart-type	Intervalle	Moyenne	Écart-type	Intervalle
SiO ₂	13,93	1,03	13,20-14,74	13,02	0,26	12,62-13,20	13,12	1,04	12,38-16,74
Al ₂ O ₃	4,07	0,19	3,84-4,20	2,38	0,11	2,30-2,48	2,52	0,51	2,16-3,65
TiO ₂	0,11	0,12	0,02-0,19	0,12	0,00	0,12-0,12	0,12	0,01	0,11-0,15
P ₂ O ₅	0,05	0,01	0,02-0,05	0,05	0,01	0,03-0,05	0,04	0,01	0,03-0,06
Fe ₂ O ₃	1,46	0,08	1,40-1,51	1,89	0,02	1,83-1,90	1,67	0,21	1,40-1,81
CaO	42,05	3,51	39,50-44,73	46,50	1,00	45,09-47,20	49,72	3,44	46,78-57,48
MgO	0,92	0,03	0,90-0,98	2,70	0,71	2,20-3,22	2,84	0,19	2,70-3,97
Na ₂ O	0,12	0,03	0,10-0,18	0,19	0,02	0,15-0,22	0,34	0,15	0,19-0,51
K ₂ O	2,54	0,37	2,04-2,55	2,33	0,61	1,76-2,94	8,21	4,31	4,00-11,25
SO ₃	4,74	2,21	3,16-6,30	4,22	1,96	2,81-5,60	7,34	4,74	3,86-10,69
LOI	27,82	0,45	27,20-28,19	26,61	2,70	24,70-29,73	15,59	9,08	2,47-22,10
Total	99,65	0,48		99,65	0,59		101,6	1,97	
CL	0,42	0,23	0,26-0,59	0,24	0,05	0,18-0,33	0,83	0,18	0,27-1,08
f CaO	2,47	0,88	2,40-3,72	8,93	2,09	5,92-10,35	24,13	7,80	18,61-40,17

L'alumine se distingue par un domaine intermédiaire défini par les limites: 2,3 et 4,2%.

Il a semblé judicieux de procéder à l'élaboration d'un diagramme ternaire. Celui-ci en incorporant les phases clés affectant le phénomène d'expansion permettra, dans un premier temps, de délimiter le domaine d'existence des CKD.

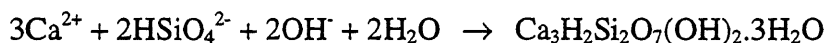
Par phases clés, il est désigné les systèmes susceptibles de contrôler la prépondérance de l'action expansive sur l'effet pouzzolanique ou vice-versa. Il est établi que l'expansion est régie par des réactions chimiques faisant appel à l'association de certains ions spécifiques permettant la formation de produits expansifs tels que l'ettringite, le gypse et, dans certains cas, la portlandite [TAYLOR, 1993].

Ces phases sont obtenues selon les réactions:



Il apparaît d'ores et déjà que les ions responsables du phénomène d'expansion sont: Ca^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ et SO_4^{2-} . Ce qui justifie tout à fait le choix à retenir ces phases pour l'élaboration des diagrammes de composition nominale. L'analogie structurale et chimique entre SO_4^{2-} et CO_3^{2-} laisse penser à une substitution des anions sulfates par les carbonates dans la structure de l'ettringite.

En parallèle à ce phénomène d'expansion, il se passe une réaction pouzzolanique dans laquelle intervient des oligomères d'oxyde réactifs du type $(\text{H}_n\text{Si}_n\text{O}_{3n+1})^{2n-}$ et des ions Ca^{2+} selon la réaction:



La stoechiométrie de l'hydrate formé correspond à un rapport de $\text{Ca/Si}=1,5$ et correspondant à un CSH de composition moyenne $\text{C}_{1,5} \text{S} \text{H}_{2,5}$. Ce qui amène à considérer la silice soluble comme un élément primordial dans la réaction de consolidation des CKD. Ne disposant pas de technique adéquate pour la quantification de la silice amorphe, le tracé des diagrammes d'équilibre des CKD a été effectué en tenant compte de la silice totale.

L'oxyde de calcium (CaO) considéré correspond à la teneur globale dans l'échantillon et non pas à la chaux libre. Le choix des oxydes alcalins est justifié par le fait qu'ils sont

représentatifs des groupements sulfates auxquels ils sont majoritairement liés. Les diagrammes de phases des CKD reportés au figures 4.1 à 4.4 ont été élaborés à partir d'environ 50 échantillons provenant de différents horizons.

À partir du diagramme ternaire $(\text{CaO}+\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-(Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$, il apparaît que le domaine d'existence est délimité par: $15\% < \text{SiO}_2 < 30\%$; $65\% < (\text{CaO}+\text{MgO}) < 78\%$ et $1\% < (\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3) < 12\%$. Dans le système précédent, la substitution de $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ par les oxydes alcalins $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ présente un domaine étroit identique à celui décrit précédemment. La considération du diagramme associant les phases $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{-(CaO}+\text{MgO})\text{-(K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ indique un domaine délimité par des compositions: $60\% < (\text{CaO}+\text{MgO}) < 90\%$; $1\% < \text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3 < 15\%$ et $1\% < (\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) < 25\%$.

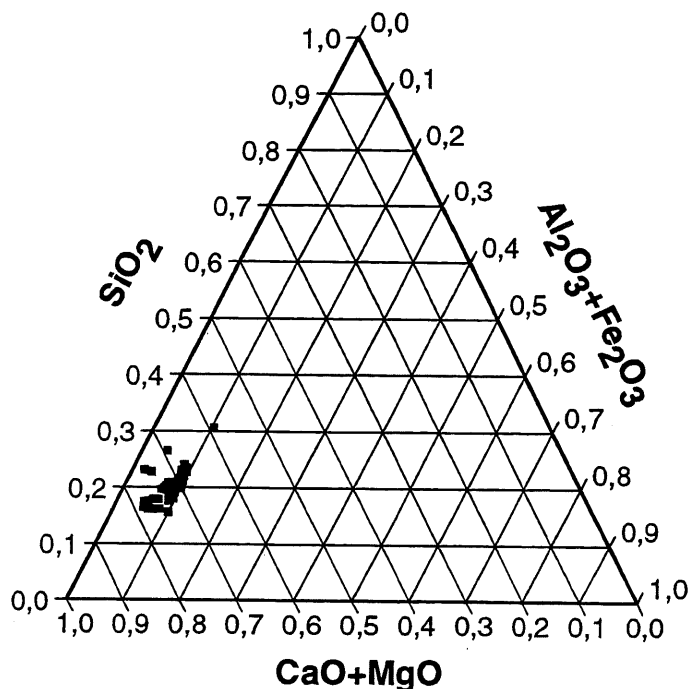


Figure 4.1 Diagramme ternaire $(\text{SiO}_2)\text{-(Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{-(CaO}+\text{MgO})$

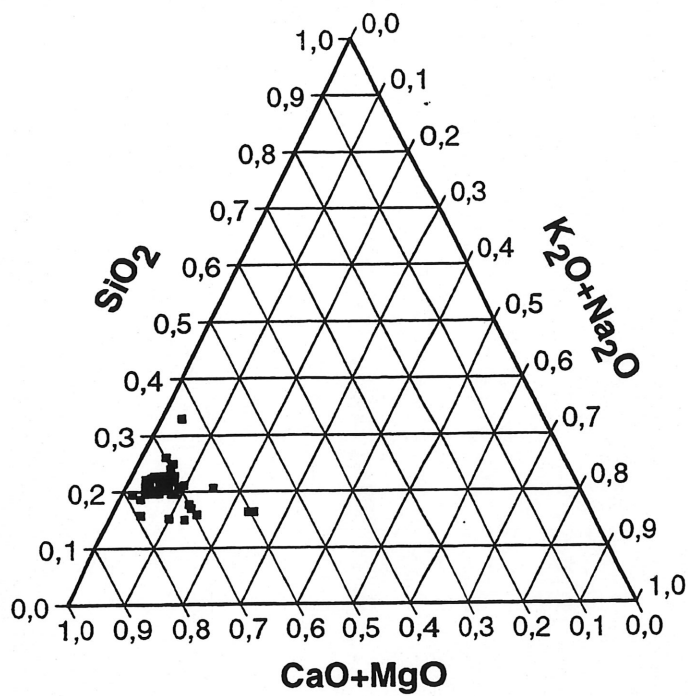


Figure 4.2 Diagramme ternaire (SiO_2) -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)-(CaO+MgO)

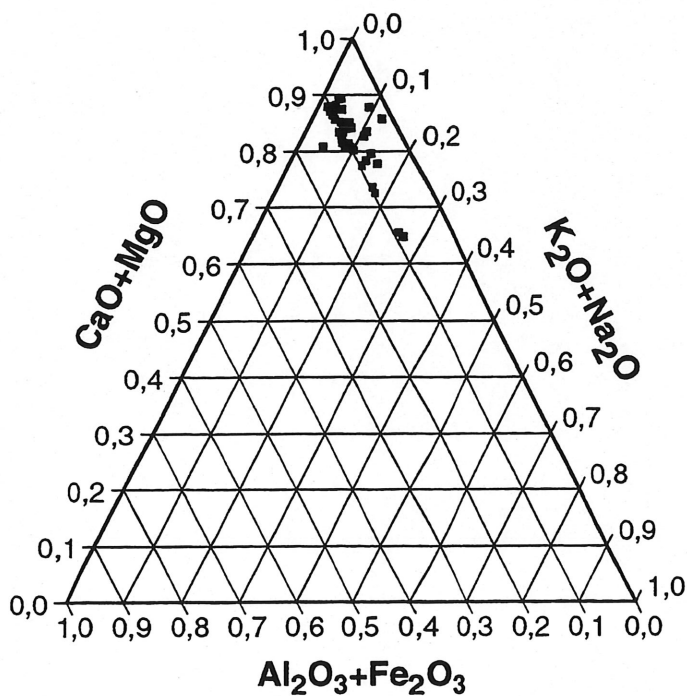


Figure 4.3 Diagramme ternaire (CaO+MgO)-($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)- ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$)

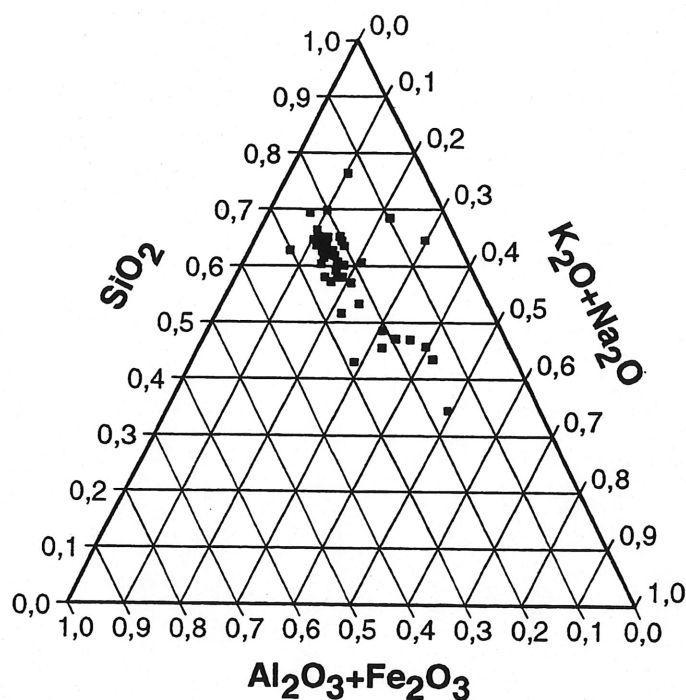


Figure 4.4 Diagramme ternaire (SiO_2)-($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)- ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Pour approcher le comportement général des CKD-ajouts minéraux, quatre poussières de four de cimenterie les plus représentatives ont été mises à contribution pour l'étude de la variabilité chimique, basée essentiellement sur la teneur en chaux libre (Tableau 4.5) [RHOZLANE, 1995]:

TABLEAU 4.5 POUSSIÈRES REPRÉSENTATIVES DE LA VARIABILITÉ CHIMIQUE DES CKD

Désignation	Brookfield	Exshaw4	Alpena5	Exshaw5
SiO_2	14,64	13,19	14,45	16,74
Al_2O_3	4,20	2,31	3,47	3,65
TiO_2	0,02	0,12	0,17	0,15
P_2O_5	0,05	0,03	0,06	0,06
Fe_2O_3	1,40	1,87	1,82	1,80
CaO	39,60	47,23	52,60	56,64
MgO	0,90	2,24	1,46	3,97
Na_2O	0,10	0,22	0,15	0,22
K_2O	2,04	2,94	2,60	4,07
SO_3	4,10	5,60	17,00	6,53
LOI	27,04	24,73	6,92	6,18
Total	100,33	100,48	100,70	100,07
Cl	0,26	0,18	0,32	0,27
f CaO	3,72	10,35	22,03	40,17

4.1.2 Propriétés physiques des CKD

Le tableau 4.6 englobe l'ensemble des propriétés texturales de certaines poussières de four de cimenteries.

TABEAU 4.6 ANALYSE PHYSIQUE DE CERTAINES POUSSIÈRES [RHOZLANE, 1995]

Nom des poussières	Densité	Blaine (cm ² /g)	45 microns (% passant)
Alpena 5	3,01	4 680	78,90
Alpena 6	2,98	5 270	74,80
Brookfield	2,70	6 400	74,98
Exshaw	2,85	2 100	66,70

L'analyse des résultats reportés dans le tableau 4.6 montre des valeurs de densité oscillant entre 2,70 et 3,01. En ce qui concerne la surface spécifique Blaine, son domaine de variation paraît étalé. Quant à la surface spécifique, sa détermination a été effectuée par volumétrie (méthode BET: Brunauer-Emett-Teller, 1938) utilisant l'azote comme physisorbat. Sans qu'elles ne soient reportées dans le tableau précédent, les valeurs obtenues sont relativement faibles et sont estimées à environ 1,0 m²/g.

À titre de comparaison, le dépouillement des résultats relatifs à la répartition granulométrique des différents CKD (Figure 4.5) montre une certaine finesse pour les CKD Brookfield. Au contraire, une multiplication de la taille des cristallites est observée pour les poussières Exshaw dans lesquelles la chaux libre (CaO) prédomine.

En ce qui concerne les CKD Alpena et Brookfield, une granulométrie intermédiaire entre Exshaw est relevée. Cette particularité provient essentiellement des teneurs à peu près équivalentes en chaux libre et en calcite dans les deux systèmes.

En somme, plus le système est riche en chaux, plus grande est la granulométrie. Par contre, la prépondérance de la calcite sur la chaux libre amène à l'apparition d'un mélange avec une granulométrie plus fine.

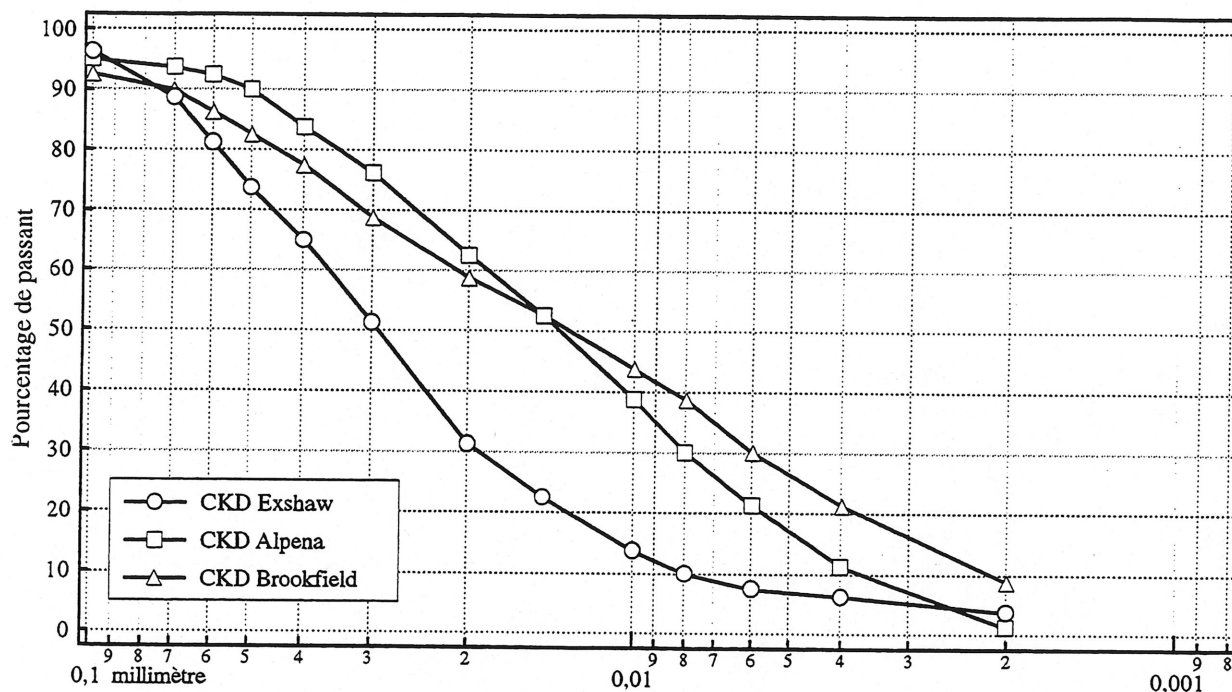


Figure 4.5 Courbes granulométriques de différentes poussières.

La poussière d'Exshaw possède donc une granulométrie assez uniforme et le plus important pourcentage de grains les plus gros: 32% de passant à 20 mm et seulement 14% à 10 mm. Sa granulométrie est conditionnée par son fort pourcentage de chaux libre, alors que la poussière de Brookfield l'est par la calcite. Les autres poussières, contenant des teneurs moyennes en chaux libre et en calcite, se situent entre ces deux extrêmes.

Les courbes granulométriques précédentes donnent les résultats pour les différentes poussières, toutes issues des usines de la compagnie Lafarge Canada.

4.1.3 Propriétés minéralogiques des CKD

a) Analyses par diffraction des rayons X

L'étude de 103 échantillons provenant de 102 usines, représentant environ 70% de l'industrie américaine de ciment, a fait ressortir les principaux résultats décrits ci-dessous [BENJAMIN et coll., 1982]:

- la calcite est un constituant majeur dans environ 94% des échantillons;
- la chaux et l'anhydrite constituent les phases minérales principales après la calcite dans 70 à 80% des cas;
- le quartz existe en faibles quantités dans presque tous les échantillons.

L'étude réalisée par Benjamin et coll. (1982) a montré que 8% des échantillons contenaient de l'aphthitalite $(K, Na)_2 SO_4$, de l'arcanite K_2SO_4 et de la sylvite $K Cl$.

Dans le but de suivre l'évolution des diverses transformations chimiques, des prélèvements ont été effectués à différents temps d'hydratation. L'hydratation est arrêtée par une série de broyage, d'ajout d'acétone et séchage à 110 °C. L'analyse des spectres montre un système hétérogène pour les poussières de four de cimenterie. Ce système polyphasique (Tableau 4.7) présente comme phases minérales principales la calcite, la chaux, et comme phases secondaires l'arcanite, l'anhydrite et la dolomite. En se basant sur la largeur à mi-hauteur des raies principales, ces poussières montrent une bonne cristallinité de leurs phases minérales contrairement aux cendres volantes constituées essentiellement de minéraux vitreux et accessoirement de phases cristallines de quartz, de magnésite et parfois de la mullite.

TABLEAU 4.7 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES CKD AVANT HYDRATATION

Alpena	Brookfield	Exshaw 4	Exshaw 5	Formule
Calcite	+	+	+	$CaCO_3$
Chaux	+	+	+	CaO
Quartz	+	+	+	SiO_2
Anhydrite	+	+	+	$CaSO_4$
Dolomite	-	+	-	$CaMg(CO_3)_2$
Arcanite	-	-	+	K_2SO_4

Dans la composition minéralogique après 1 jour d'hydratation (Tableau 4.8), on a constaté en général la disparition de la chaux, de l'anhydrite, et la formation de la portlandite.

TABLEAU 4.8 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES CKD APRÈS 1 JOUR D'HYDRATATION

Alpena	Brookfield	Exshaw 4	Exshaw 5	Formule
Calcite	+	+	+	CaCO_3
Chaux	-	-	-	CaO
Quartz	+	+	+	SiO_2
Anhydrite	-	-	-	CaSO_4
Arcanite	-	-	+	K_2SO_4
Dolomite	-	+	-	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Portlandite	-	+	+	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Ettringite	-	-	-	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

Après 24 heures d'hydratation, la syngénite, le gypse et l'ettringite sont les termes finaux des transformations chimiques dans lesquelles interviennent les ions issus principalement de l'arcanite, de l'anhydrite et de la chaux.

b) Analyses thermogravimétriques des CKD

Comme il a été souligné, l'analyse thermogravimétrique a été réalisée à l'aide d'un ensemble TG-ATG-ATD dans le but d'avoir des informations sur l'évolution des masses en fonction du temps et de la température. La mesure s'effectue sur environ une quinzaine de milligrammes de produit. Le chauffage est réalisé avec une vitesse de chauffage de 10 °C/min, de la température ambiante jusqu'à 1 100 °C sous courant d'azote (débit 100 ml/min). Les échantillons sont préalablement hydratés pour quantifier la teneur en chaux libre.

Les courbes TG, ATG, et ATD pour la poussière Exshaw4 après hydratation de 24 heures, accusent trois transformations principales:

- la première endothermique apparaît sous forme d'un pic large à 398 °C traduisant le départ de l'eau suite à la décomposition de la portlandite en chaux libre. Cette perte représente environ 0,5% ce qui correspond à une teneur de 2% en portlandite;
- la seconde également endothermique est manifestée par un pic large à 774 °C et correspond à un départ massif de gaz carbonique suite à la décomposition de la calcite. À partir de la courbe TG, cette perte représente 20% et correspond à une teneur de 45% en

calcite. Cette décomposition se manifeste dès 550 °C et se poursuit jusqu'à 840 °C. En outre et par déconvolution, on note la présence d'un épaulement dont le maximum est situé approximativement à 710 °C. Ce pic peut être attribué à la décomposition de la dolomite avec un départ de gaz carbonique;

- une dérive à plus de 850 °C pouvant être attribuée à une réorganisation cristalline d'une phase vitreuse puisque aucune variation significative n'est observée sur la courbe TG-DTG.

Pour la poussière Exshaw5, les spectres montrent une différence se traduisant par un pic intense pour la portlandite. La perte en poids correspondante est de 3%, ce qui correspond à 12,3% en portlandite. Au contraire, la teneur en calcite est plus faible et elle se situe près de 31%.

Les courbes TG, ATG et ATD pour la poussière Brookfield montre une valeur faible pour la portlandite de l'ordre de 1% et un pic mieux développé et intense pour la calcite 60%. Pour la poussière Alpena, 33 % en calcite et 11% en portlandite sont déterminés.

4.2 Caractérisation des ajouts minéraux

La fissuration causée par des réactions chimiques expansives peut se corriger d'une part à l'aide d'additifs dont les ingrédients peuvent limiter les réactions expansives. D'autre part, on peut limiter les effets de l'expansion en augmentant l'importance des réactions entraînant des contractions (des retraits) ou encore en augmentant la capacité du milieu à résister physiquement à l'expansion. Ces dernières solutions font plutôt appel à des additifs riches en silice (comme les cendres volantes), ou à des liants hydrauliques supplémentaires (ajout de faibles quantités de ciment). Le coût d'un ajout sera essentiellement dépendant de sa disponibilité et de sa valeur marchande. Le cas idéal étant celui d'un additif considéré comme un déchet par son fournisseur et disponible en quantité suffisante à proximité du site de production des poussières.

4.2.1 Propriétés chimiques des ajouts minéraux

Les cendres volantes ont une chimie variable mais dans des proportions beaucoup moins importantes que les poussières de four de cimenterie. Cependant, l'âge de la centrale thermique, les conditions d'opération ainsi que le processus de récupération des cendres volantes affectent leurs caractéristiques chimiques et physiques. À titre d'exemple, nous avons effectué des travaux

sur la composition chimique de la cendre volante de Nanticoke. Les pourcentages des différents éléments relevés durant le mois de juin 1996 sont présentés au tableau 4.9.

TABLEAU 4.9 VARIABILITÉ CHIMIQUE DE LA CENDRE VOLANTE DE NANTICOKE

	Teneur en eau	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	LOI	Total
JUN01/96	0,07	0,75	1,03	1,43	48,8	17,8	8,58	4,38	0,82	1,00	7,56	90,72
JUN07/96	0,12	0,51	1,53	1,52	49,9	29,3	4,35	5,29	0,87	0,98	11,22	103,97
JUN08/96	0,13	0,52	1,55	1,54	49,1	28,8	4,17	5,27	0,83	1,10	12,39	103,73
JUN09/96	0,12	0,48	1,53	1,49	49,7	29,5	3,32	5,10	0,87	0,99	11,47	102,97
JUN13/96	0,11	0,46	1,50	1,45	49,0	29,2	3,48	5,29	0,87	1,08	12,67	103,53
JUN14/96	0,12	0,54	1,54	1,56	49,7	28,3	3,90	5,15	0,94	1,02	11,07	102,19
JUN14/96	0,14	0,41	1,77	1,58	50,0	31,4	3,40	5,08	0,86	1,05	13,10	107,10
JUN15/96	0,13	0,48	1,64	1,55	49,7	28,8	3,98	5,39	0,86	0,98	11,42	103,25
JUN15/96	0,10	0,48	1,64	1,56	49,3	30,6	3,04	5,12	0,90	1,03	12,94	104,99
JUN28/96	0,11	0,50	1,70	1,62	48,9	28,0	4,45	5,28	0,88	1,00	11,07	101,69
JUN29/96	0,16	0,46	1,70	1,58	49,2	29,5	3,56	5,20	0,91	0,96	10,81	102,34
JUN29/96	0,35	0,71	1,17	1,48	48,8	19,9	7,49	4,13	0,77	1,04	9,65	93,68

D'après le tableau 4.10 présentant la composition chimique des différentes cendres volantes utilisées, on remarque la richesse de ces matériaux en aluminés, en silice et une déficience par rapport au CKD des autres éléments, surtout en chaux, en alcalis et en sulfates. Les types C sont riches en CaO et une faible perte au feu ne dépassant pas 1% tandis que les types F, à l'exception d'Exshaw, présentent des pertes au feu allant jusqu'à 30% par CKD.

TABLEAU 4.10 COMPOSITION CHIMIQUE DES CENDRES VOLANTES

	Exshaw Type F	Presque Isle Type C	Presque Isle Type F	Edgewater Type C	Nanticoke Type F	Saint Clair Type C	Valley Type F
SiO ₂	58,12	42,43	39,46	34,84	48,40	31,12	35,42
Al ₂ O ₃	21,96	20,99	17,71	17,44	18,40	18,20	16,61
Fe ₂ O ₃	3,77	5,21	4,39	6,91	4,30	6,06	10,77
CaO	10,83	17,53	2,78	26,93	7,83	19,74	2,05
MgO	1,46	3,49	1,28	4,93	---	3,66	0,51
SO ₃	0,21	1,69	1,67	1,94	1,06	7,76	1,63
K ₂ O	0,92	0,82	0,67	0,30	1,10	1,00	1,15
Na ₂ O	0,58	3,69	2,06	1,19	0,55	7,71	0,31
TiO ₂	---	1,04	0,64	1,35	0,83	---	0,74
P ₂ O ₅	---	0,51	0,40	1,79	---	---	0,32
Mn ₂ O ₃	---	0,13	0,04	0,05	---	0,13	0,04
SrO	---	0,65	0,41	0,61	---	---	0,19
LOI	0,83	0,63	29,33	0,29	11,26	---	31,88
Total	98,68	98,80	100,83	98,57	93,75	---	101,62
Cl	---	0,003	0,005	0,003	---	0,300	---

Le ciment type 10 utilisé a la composition suivante: $C_3S = 50\%$, $C_2S = 22\%$, $C_3A = 7,7\%$, $C_4AF = 8,5\%$, une surface Blaine de l'ordre de $370 \text{ m}^2/\text{kg}$. La granulométrie peut être représentée par le pourcentage passant 45 microns d'environ 90%.

4.2.2 Propriétés physiques des ajouts minéraux

Le tableau 4.11 englobe l'ensemble des propriétés texturales des ajouts minéraux.

TABLEAU 4.11 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX

Nom de l'ajout	Masse volumique (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	45 microns (% passant)
Exshaw Type F	2,23	2237	88,25
Presque Isle Type F	2,13	8790	43,34
Nanticoke Type F	2,15	8156	47,70
Valley Type F	2,18	7615	51,65
Saint Clair Type C	2,60	3120	85,72
Presque Isle type C	2,46	2890	86,98
Edgewater Type C	2,75	3580	82,66

Les particules des cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères allant de 2 à $100 \mu\text{m}$. L'analyse de la masse volumique montre un domaine de variation étalé entre 2,1 et $2,8 \text{ g}/\text{cm}^3$. L'influence des réactions pouzzolaniques ou hydrauliques des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers a été évaluée en se basant sur l'essai ASTM C311. Des cubes de 5 cm de côté confectionnés avec un sable normalisé (sable d'Ottawa) sont mûris 28 jours à la chambre humide puis leur résistance en compression est comparée à celle d'un témoin sans ajout.

Le tableau 4.12 présente les résistances à la compression et l'indice de pouzzolanité des mélanges cendres volantes-ciment à 28 jours. Le dosage utilisé est de 10% en remplacement en masse du ciment par les cendres volantes. Un rapport eau/liant de 0,30 a été choisi. Les résistances obtenues varient de 22 à 39 MPa, ce qui correspond à des indices de pouzzolanité de 88 à 156%.

TABLEAU 4.12 INDICE DE POUZZOLANICITÉ À 28 JOURS

Nom de l'ajout	% ajout*	Résistance à la compression (MPa)	Indice de pouzzolanicité (%)
Témoin	0	25	100
CV Exshaw	10	34	136
CV Saint Clair	10	39	156
CV Edgewater	10	37	148
CV Nanticoke	10	22	88

*: Remplacement en masse du ciment

Pour la cendre volante Exshaw, des mélanges à divers pourcentages de ciment ont été réalisés. Le tableau 4.13 englobe les résultats des résistances à la compression et à la traction à 14 et 28 jours. Ces résultats montrent que les résistances augmentent au cours du temps et qu'elles sont fonction des pourcentages de ciment ajouté.

TABLEAU 4.13 RÉSISTANCES MÉCANIQUES DES CENDRES VOLANTES EXSHAW-CIMENT

	Mélanges	CV+5%C	CV+10%C	CV+15%C	CV+20%C	CV+30%C
à 14 jours	C ₀ (MPa)	3,78	6,68	8,53	10,90	28,23
	T ₀ (MPa)	0,32	0,99	1,69	1,52	2,56
	C ₀ / T ₀	11,81	6,75	5,05	7,17	11,03
à 28 jours	C ₀ (MPa)	6,11	7,65	16,01	20,14	35,99
	T ₀ (MPa)	0,47	1,47	2,27	2,48	2,09
	C ₀ / T ₀	13,00	5,20	7,12	8,12	17,22
C _{0 28} / C _{0 14}		1,62	1,15	1,88	1,85	1,27

Ces résultats préliminaires peuvent être complétés par une étude plus étayée en vue d'une éventuelle exploitation en tant que barrière environnementale pour les régions ou pays ne disposant que de cendres volantes.

4.2.3 Propriétés minéralogiques des ajouts minéraux

Les phases majeures identifiées pour les cendres volantes sont la silice, la mullite et la chaux. Toutes les cendres volantes présentent une constitution mixte: une fraction vitreuse associée à une fraction cristalline plus ou moins importante.

Le tableau 4.14 montre la composition minéralogique des mélanges des poussières de four d'Alpena, de cendres volantes et de ciment mûris 14 jours à l'air humide. Les compositions sont très similaires. Dans le cas des mélanges avec ciment, le pic en portlandite est faible, ce qui peut s'expliquer par la formation importante de CSH qui prend le calcium à ces minéraux. À 28 jours, la composition minéralogique n'a pas beaucoup changé: la quantité de la portlandite décroît et le calcium est utilisé pour la formation de CSH.

TABEAU 4.14 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES MÉLANGES ALPENA

Mélange	Composition					
	Calcite	Ettringite	Portlandite	Quartz	Syngénite	Gypse
Alpena+10% Pulliam	+	+	+	+	+	+
Alpena+10% Pulliam+2% Ciment	+	+	+	+	+	
Alpena+10% Nanticoke	+	+	+	+	+	
Alpena+10% Nanticoke+2% Ciment	+	+	+	+	+	+
Alpena+10% River Rouge	+	+	+	+	+	+
Alpena+10% River Rouge+2% Ciment	+	+	+	+	+	+

L'analyse microscopique a permis de confirmer l'hétérogénéité minéralogique et morphologique des systèmes comme peuvent en témoigner les photos aux figures 4.6 et 4.7.



Figure 4.6 Vue générale de la poussière de Brookfield au microscope électronique à balayage

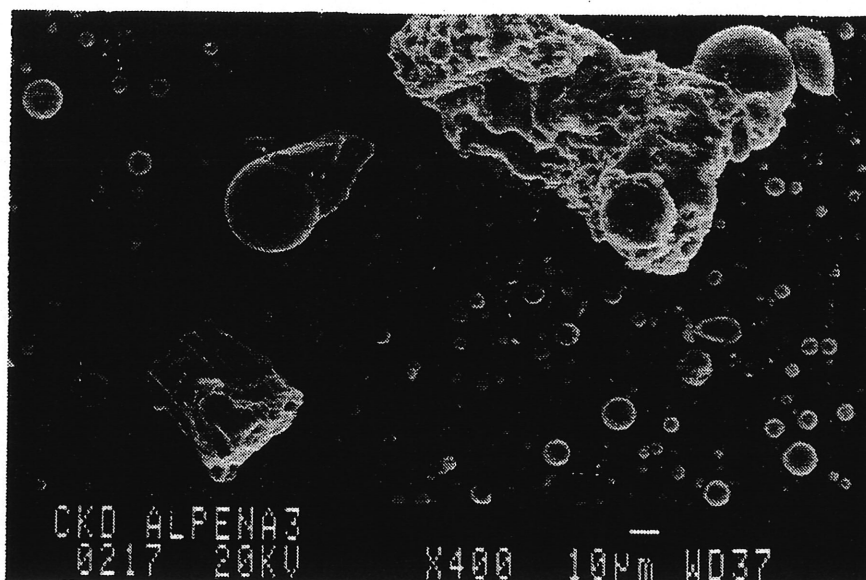


Figure 4.7 Vue générale de la poussière d'Alpena au microscope électronique à balayage

4.3 Comportement au compactage des poussières sans ajouts minéraux

Cette section résume une partie des essais préliminaires qui ont permis de choisir le mode de préparation des mélanges et de dégager les facteurs influençant la stabilisation des poussières de four de cimenterie à l'aide des ajouts minéraux. Pour ce faire, trois séries de mélanges différentes par leur mode de préparation ont été réalisées. La première série consiste à placer 20 % de la masse sèche du solide dans des moules en PVC coupés en deux longitudinalement, maintenus par quatre collets métalliques afin d'assurer le confinement. La mise en place est réalisée par une faible compaction. Après 48 heures de mûrissement dans la chambre humide, les échantillons sont démoulés. La deuxième série consiste en une mise en place par hydro-compaction. La quantité d'eau utilisée est de 100% de la masse sèche du solide. Après 48 heures de mûrissement dans la chambre humide, les échantillons sont démoulés. La troisième série consiste à préparer les échantillons selon la norme de l'essai proctor normalisé D-698 de l'ASTM. Il s'agit d'un compactage dans des moules en PVC fendus. Après 48 heures de mûrissement dans la chambre humide, les échantillons continuent leur mûrissement, soit à l'air de la chambre, soit immergé dans l'eau jusqu'à usinage.

L'augmentation de la température mesurée lors du malaxage pour différents rapports eau-poussières est donnée au tableau 4.15. Cette augmentation entraîne une perte en eau dans le mélange, soit par évaporation, soit par recombinaison par l'intermédiaire des réactions d'hydratation. L'augmentation de la température est presque exponentielle avec le pourcentage de chaux libre contenue dans les différentes poussières (Figure 4.46). Il est à noter que l'augmentation de la température est d'autant plus importante que la masse du mélange est grande.

TABLEAU 4.15 TEMPÉRATURE POUR 2 MIN DE MALAXAGE POUR UNE MASSE DE 3 KG

	BR			K4			KG5			K5		
E/P (%)	21	24	29	25	30	35	35	38	42	45	50	55
Température (°C)	25	24	24	60	66	69	70	74	80	90	94	94
Perte en eau (%)	3	2	2	7	9	10	11	16	19	22	26	29

Pour les trois séries, il ressort que l'apparition des fissures a mené à l'effritement total des échantillons à base de KG5, K4 et K5 de la première série. L'eau de malaxage étant trop faible pour hydrater la totalité de la chaux libre. Les échantillons à base de BR n'ont pas montré de signe de fissuration. Pour la deuxième série, tous les échantillons ont montré une très grande fissuration qui a rendu impossible la réalisation des essais. Des sections d'échantillons indiquent leur grande porosité. La fissuration est polygonale et généralisée, devenant de plus en plus intense et ouverte surtout vers le bord des éprouvettes. Pour la troisième série, tous les échantillons immergés dans l'eau ont montré de la fissuration ou de l'effritement. Les échantillons mûris à l'air humide ont montré une très bonne résistance à la fissuration. Des sections d'échantillons indiquent que l'hydratation est incomplète dans le coeur des éprouvettes.

Les valeurs du temps de prise des différentes poussières montrent que le temps de prise final est obtenu aux alentours de 24 heures pour toutes les poussières.

4.4 Caractérisation mécanique des mélanges développés

Ces caractéristiques vont conditionner le design des barrières à développer. En effet, la résistance à la compression simple conditionne la hauteur limite des déchets entreposés au-dessus de la barrière. Elle permet avec la résistance en traction T_0 , la détermination de l'état des contraintes au-delà duquel la rupture de la barrière a lieu. Le module d'élasticité de la barrière renseigne sur les déformations qu'elle subit et permet d'en tenir compte dans la conception des ouvrages annexes incorporés. Pour assurer une bonne adaptation de la barrière aux déformations anisotropes du sol de la fondation telles que les tassements différentiels de faible ampleur, la barrière doit pouvoir dissiper de l'énergie à travers un comportement élasto-plastique. Étant donné le comportement de ces mélanges, les critères de performance visés seront ceux d'une argile raide et d'une roche tendre. Ainsi, la barrière réalisée devra satisfaire les critères suivants advenant une éventuelle application:

- un coefficient de Poisson de 0,3 à 0,4;
- un module d'élasticité compris entre 50 à 100 MPa;
- une résistance à la compression d'environ 1,4 MPa: celle-ci est considérée avec un coefficient de sécurité de 3 par rapport à la charge maximale apportée par le dépôt;
- une déformation à la rupture de l'ordre de 1%.

Pour faciliter la compréhension de cette démarche, on présente les résultats pour chaque poussière séparément suivis par une synthèse à titre de comparaison.

4.4.1 Poussières du four de l'usine d'Exshaw

Cette partie traite des poussières des fours 4 (K4) et 5 (K5) provenant de la cimenterie d'Exshaw. Les cendres volantes décrites dans la partie des ajouts minéraux et le ciment de type 10 sont ceux de Lafarge. Une partie des résultats mécaniques concernant les mélanges avec des poussières de four de cimenterie est présentée dans les différents tableaux suivants.

- Exshaw 5

Les poussières K5, par leur composition minéralogique où la chaux libre prédomine, ne se prêtent pas facilement au malaxage.

Après 7 jours de mûrissement à l'air humide, les résultats obtenus montrent que l'adjonction des cendres volantes aux CKD à des teneurs allant jusqu'à 20% n'entraîne pas de variation significative de la résistance à la compression et à la traction.-

TABLEAU 4.16 VALEURS DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA TRACTION À 7 JOURS

Mélanges	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	C_0/T_0
K5	6,57	0,64	10,27
K5+10%CV	3,18	0,23	13,83
K5+15%CV	3,38	0,75	4,5
K5+20%CV	3,22	0,57	5,65
K5+10%CV+2%C	4,52	0,33	13,7
K5+10%CV+5%C	5,78	0,77	7,51

L'introduction du facteur temps permet de justifier le choix de 10%CV comme ajout (Figure 4.8). Une nette amélioration des résistances est constatée puisque les valeurs relevées sont de 12,2 et 1,8 MPa pour l'échantillon à 56 jours de mûrissement contre 3,2 et 0,2 MPa pour celui à 7 jours. Cette augmentation est due à la réduction de la taille des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de CSH en remplacement de la chaux.

Bien que les performances obtenues soient inférieures à celles relatives aux CKD, il apparaît, néanmoins, que la présence de 10% de CV amène des résistances pratiquement similaires aux échantillons ayant des teneurs plus élevées en cendres volantes. Ce comportement est tout à fait normal car l'effet des cendres volantes est lent à se développer à 7 jours. Cette observation, a guidé le choix à retenir ce pourcentage pour la suite de l'étude. En effet, pour les systèmes avec des teneurs en cendres volantes supérieures à 10 %, il a été constaté une certaine fissuration des systèmes considérés.

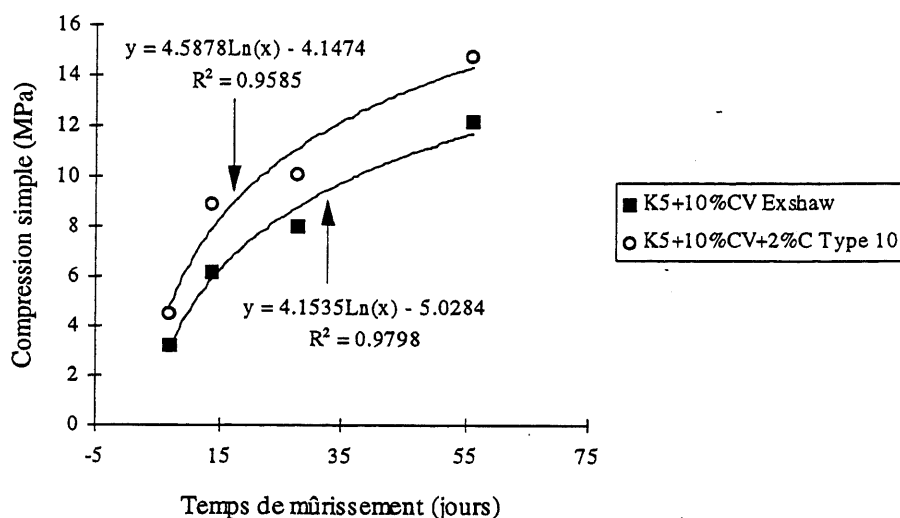


Figure 4.8 Évolution de la résistance à la compression pour le mélange K5+10%CV

En effet, l'analyse par diffraction des rayons X du système CKD K5 + 10%CV montre une modification de la teneur en certaines phases présentes dans le système. Il apparaît une augmentation de l'ettringite avec l'accroissement de la teneur en cendres volantes au détriment de la syngénite. Cette évolution est le résultat de l'interaction chimique entre les ions Ca^{2+} , SO_4^{2-} et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ qui entraîne la précipitation de l'ettringite ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) selon la réaction:



L'analyse thermogravimétrique (Annexe 3) pour l'ensemble des échantillons, montre des spectres avec une allure pratiquement identique. On constate:

- un chevauchement de deux pics de décomposition, le premier situé à environ 75 °C et correspond à un départ d'eau, résultat d'une désorption ou de la décomposition de l'ettringite. Le second pic est situé à environ 90 °C. Le pic caractéristique de la décomposition du gypse en hémihydrate est difficilement détectable (130 °C);
- en se basant sur les pertes enregistrées sur la courbe TG, il apparaît que la teneur en portlandite caractérisée par le pic de décomposition situé à environ 460 °C présente des valeurs d'environ 31,7; 35,8 et 33,7% pour les échantillons K5+10%CV, K5+15%CV, K5+20%CV respectivement;

- la calcite identifiée par son pic de décarbonatation situé à environ 690 °C présente des teneurs d'environ 7,3; 8,9 et 8,9% pour les échantillons dont l'ordre décrit précédemment. Ces teneurs sont très proches de celle relevée pour les poussières de four K5 sans ajouts.

Un effet bénéfique se manifeste avec l'ajout de 2 et 5% en ciment type 10 au mélange K5+10%CV. Il est clair que cette amélioration est expliquée par un effet de consolidation assuré par l'apport en ciment.

L'ajout de 2% en ciment ne fait que contribuer de façon notable à l'amélioration de ces deux paramètres mécaniques (Tableau 4.17). Il apparaît d'ores et déjà que ce mélange laisse de bons augures pour une éventuelle application à plus grande échelle.

TABLEAU 4.17 VALEURS DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA TRACTION POUR LE MÉLANGE K5+10%CV+2%CEMENT

Nombre de jours	7	14	28	56
C ₀ (MPa)	4.5	8.9	10.1	14.7
T ₀ (MPa)	0.3	1.5	1.7	2.2

Le critère de Fairhurst a été appliqué afin de connaître l'allure de la courbe définissant le critère de rupture. La figure 4.9 illustre les valeurs de la résistance à la compression et de la résistance à la traction à 14 jours pour les mélanges K5+10%CV (8,1 MPa et 1,1 MPa) et K5+10%CV+2%C (10,1 MPa et 1,7 MPa).

Les valeurs de la cohésion des mélanges K5+10%CV et K5+10%CV+2%C varient de 2 à 3 MPa et celles de l'angle de frottement interne se situent entre 16 et 20°. La courbe délimitant les domaines de stabilité et d'instabilité semble indiquer la présence de traction dans les deux cas (-1,5 MPa et -2,0 MPa). Le domaine de rupture du mélange avec 2% de ciment est plus restreint que celui sans ciment.

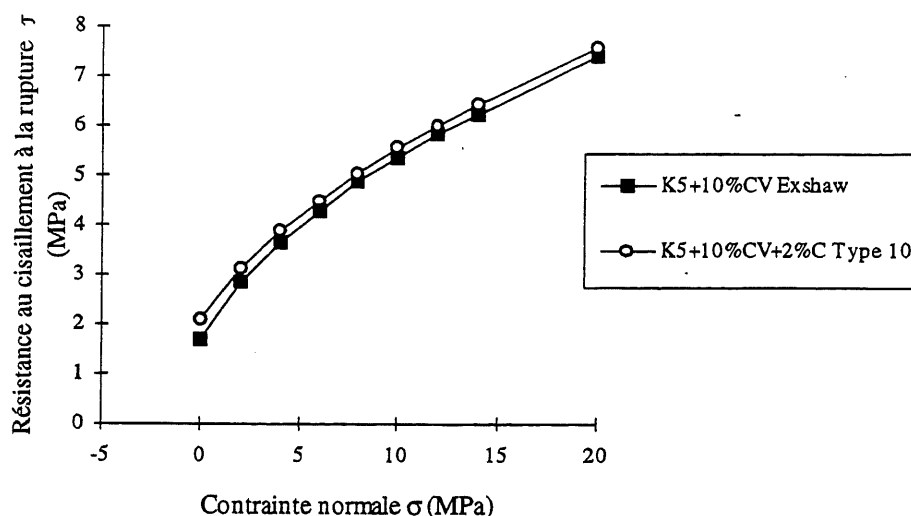


Figure 4.9 Représentation graphique du critère de Fairhurst pour les mélanges K5+10%CV et K5+10%CV+2%C à 28 jours

Les échantillons du mélange de K5+10%CV+2%C étaient compactés à différents teneurs en eau et mûris en chambre humide durant 28 jours. Deux cycles de chargement sont appliqués aux échantillons afin d'obtenir la partie linéaire de la courbe effort-déformation avec précision. Afin d'avoir des valeurs représentatives des modules d'élasticité, des charges maximales applicables et des déformations à la rupture, trois essais avec des rapports E/M variables ont été réalisés sur chaque échantillon de même nature. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le tableau 4.18 et la figure 4.10.

TABLEAU 4.18 VALEURS DES ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE AVEC MESURES EXTENSOMÉTRIQUES (28 jours)

Mélanges	E/M (%)	C_0 (MPa)	E (GPa)	$\Delta \varepsilon/\varepsilon$
K5+10%CV	45	5,1	3,9	0,4
	50	6,8	5,2	0,5
	55	4,3	4,1	0,7
K5+10%CV+2%C	45	10,7	5,3	0,4
	50	12,7	8,0	0,8
	55	9,2	7,7	0,9

La valeur du module d'élasticité semble satisfaisant pour les deux mélanges, bien que ces valeurs soient faibles, comparées à celles pour les roches et les bétons. Ces modules sont maximum à l'optimum proctor. Cependant les variations en fonction de la teneur en eau sont trop faibles. De même, la valeur de la résistance en compression à l'optimum proctor est proche de celle trouvée sur la presse Riehle et elle respecte le critère de performance défini.

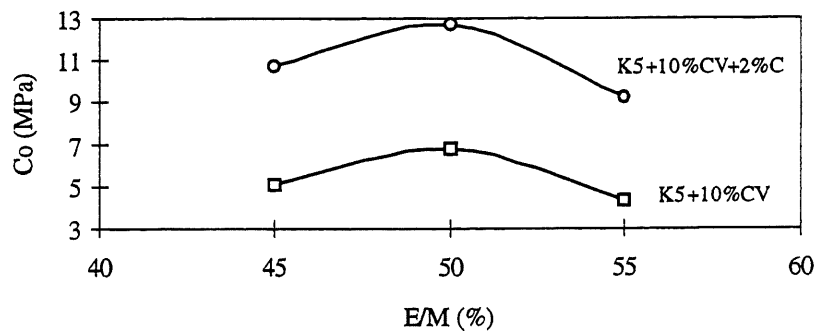


Figure 4.10 Allure de la résistance mécanique à 28 jours en fonction de la teneur en eau initiale

Les deux mélanges ont montré des courbes effort-déplacement étalées (Figure 4.11). La ductilité des mélanges augmente avec la teneur en eau avec de meilleures performances pour le mélange K5+10%CV+2%C. La valeur de la déformabilité à la rupture semble ne pas être assez élevée, mais une barrière confectionnée avec de tels mélanges devrait pouvoir s'adapter aux contraintes exercées par le dépôt ainsi qu'au sol de fondation, sans subir une fissuration préjudiciable. Il sera possible d'améliorer la ductilité du mélange: un ajout de bentonite ou d'argile est envisageable et devra être en faible quantité pour ne pas rendre le mélange trop onéreux.

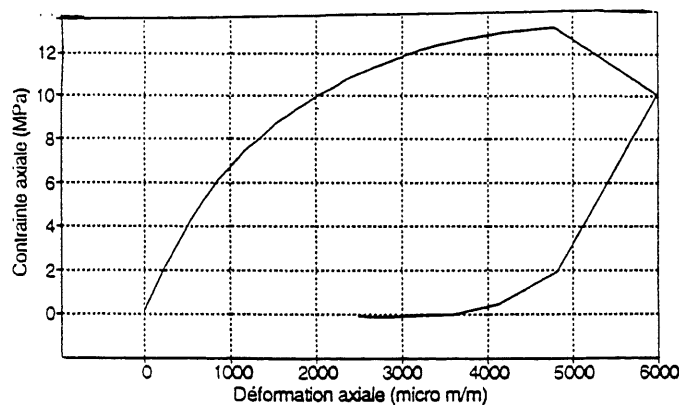


Figure 4.11 Essai de compression simple avec mesures extensométriques pour un mélange de K5+10%CV+2%C

Cette partie de l'étude a été menée sur les deux mélanges K5+10%CV+2%C et K5+10%CV avec des quantités de bentonite allant de 1 à 5% (Figure 4.12). En général, l'ajout de la bentonite provoque une baisse de la résistance à la compression pour les deux mélanges considérés. Cette baisse est proportionnelle au pourcentage de bentonite dans le mélange. Les résultats montrent que quand le rapport E/M augmente cette baisse diminue. La baisse de résistance à 28 jours est de 25% pour les mélanges à une teneur en eau initiale de 50%. Cependant, pour le module d'élasticité, le même phénomène est enregistré. La baisse du module d'élasticité est proportionnelle à la quantité de bentonite ajoutée. Par contre, les courbes effort-déformation montrent que l'ajout en bentonite augmente de façon importante la ductilité des mélanges stabilisés. La déformation à la rupture à 28 jours augmente considérablement jusqu'à une teneur de 3%, pour ensuite se stabiliser. En général, cette augmentation est de l'ordre de 30%. Cette particularité résulte probablement du caractère lamellaire de la bentonite et de son comportement en suspension dans l'eau. Il est évident que la mise en suspension de la bentonite avec des concentrations inférieures à 1 g/l entraîne la destruction des tactoïdes ainsi que des enchevêtrements turbostratiques des feuillets. Ce qui facilitera la dispersion de la bentonite sous forme d'ensembles réduits en nombre de feuillets.

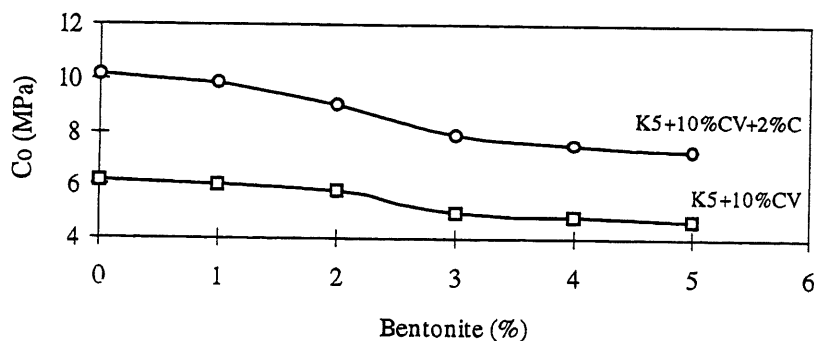


Figure 4.12 Résistance mécanique en fonction du pourcentage en bentonite

- Exshaw 4

En ce qui concerne les poussières de four 4 (K4) d'Exshaw, en se basant sur les résultats accumulés en laboratoire, l'ajout de 10 % en cendres volantes s'est avéré acceptable. Les essais ont été conduits sur les mélanges K4+10%CV Exshaw et K4+10%CV Saint-Clair. Les résultats de l'essai Proctor normal et les courbes correspondantes sont reportés en Annexe 2. Le tableau 4.19

résume les résistances à la compression en fonction du temps de mûrissement. Les résistances pour des mélanges à base de cendres volantes de type F sont inférieures à celles à base de cendres volantes de type C (Figure 4.13).

TABLEAU 4.19 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DE K4+10%CV EXSHAW - SAINT-CLAIR

Mélange	E/M (%)	Compression simple (MPa)		
		7 jours	28 jours	56 jours
K4+10%CV Exshaw	25	1,8	3,8	7,0
	30	1,9	3,8	7,9
	35 (opt.)	2,3	5,0	9,0
K4+10%CV Saint-Clair	25	4,1	12,3	13,1
	30	4,6	14,7	17,0
	35 (opt.)	13,0	18,1	22,0

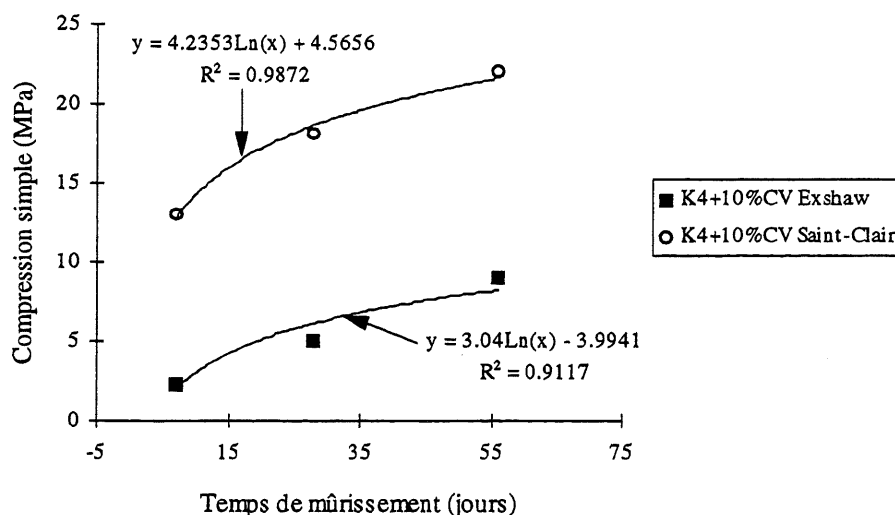


Figure 4.13 Évolution de la compression simple des mélanges de K4

La mise en œuvre d'essais soniques a permis le suivi en continu de la cinétique d'hydratation des mélanges et, en conséquence, le gain de résistance. Le tableau 4.20 donne l'évolution des paramètres dynamiques caractérisant le comportement mécanique du K4+10%CV Saint-Clair, préparé à l'optimum Proctor normal. Suite à ces résultats, on remarque l'augmentation de célérités des ondes, la stabilisation des vitesses à partir du 10^e jour, la stabilisation des modules d'élasticité autour d'une valeur de 7 GPa et la stabilisation du coefficient de Poisson à 0,2.

TABLEAU 4.20 PARAMÈTRES DYNAMIQUES

Temps (jours)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	E_{dyn} (GPa)	ν	I_c (%)
1	769,23	483,68	0,99	0,17	11,20
2	1142,86	727,27	2,21	0,16	17,55
3	1404,00	876,04	3,26	0,18	21,56
4	1448,00	918,69	3,53	0,16	22,24
5	1600,00	1094,99	4,57	0,16	24,57
6	1612,90	1094,39	4,63	0,17	24,77
7	1739,13	1147,18	5,28	0,11	26,71
8	1904,76	1099,51	5,44	0,25	29,25
9	1906,58	1114,50	5,55	0,24	29,28
10	2049,18	1215,07	6,53	0,23	31,47
11	2116,40	1269,84	7,07	0,22	32,50
12	2163,33	1263,82	7,14	0,24	33,23
17	2217,29	1257,86	7,19	0,26	34,05
18	2205,07	1257,87	7,17	0,26	33,87
21	2203,86	1261,83	7,20	0,25	33,84
22	2209,94	1257,86	7,18	0,26	33,94
23	2222,22	1291,99	7,48	0,25	34,13

4.4.2 Poussière du four de l'usine de Brookfield

Cette poussière contient en moyenne 3% en chaux libre. Les résultats des essais de proctor normalisés sont portés sur le tableau 4.21. Ces données montrent qu'on peut obtenir de fortes masses volumiques pour cette poussière sans ajouts minéraux.

TABLEAU 4.21 RÉSULTATS DES ESSAIS PROCTOR NORMALISÉS - BROOKFIELD

E/M (%)	15	20	25	30
w (%)	13	17,1	21,7	26,6
ρ_b (kg/m ³)	1605	1688,3	1933,4	1935
ρ_s (kg/m ³)	1420,4	1441,5	1588,6	1528,4
Pénétromètre (kg/m ²)	> 4,5	> 4,5	> 4,5	3,5

Les résistances à la compression simple, à la traction et les rapports C_0/T_0 sont donnés dans le tableau 4.22. Il apparaît des valeurs plus élevées pour les mélanges compactés à l'optimum proctor et mûris à l'air humide. Le mûrissement à l'eau s'avère négatif pour les échantillons.

TABLEAU 4.22 ÉVOLUTION DES RÉSISTANCES - BROOKFIELD

	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours
C_0 (MPa)	4,7	6,1	8,3	11,5
T_0 (MPa)	0,6	0,5	0,8	0,9
C_0/T_0	7,8	12,2	10,4	12,8

Les échantillons sont préparés à divers rapports E/M et compactés à la densité obtenue à l'effort normal. Il apparaît que les résistances sont conditionnées par la quantité d'eau au malaxage et que leur évolution (Figure 4.14) en fonction de la teneur en eau est semblable à celle des masses volumiques sèches obtenues à l'essai proctor normalisé.

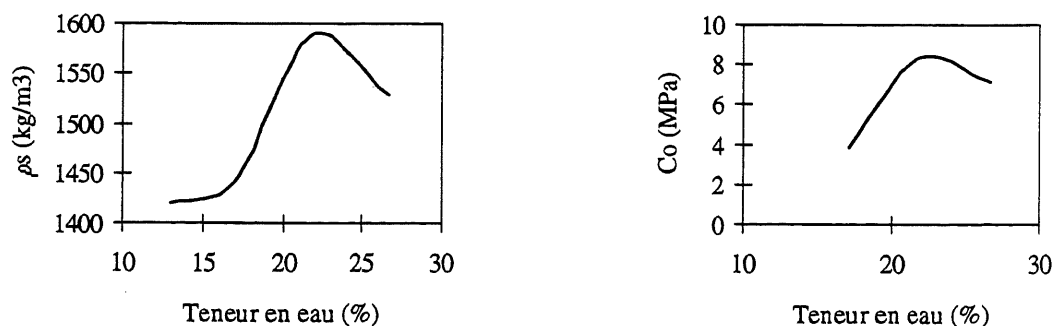


Figure 4.14 Masse volumique sèche et compression simple en fonction du rapport E/M

Les essais ultrasoniques à 7 jours de mûrissement des échantillons (Tableau 4.23) donnent des modules relativement comparables aux modules statiques obtenus lors des essais de compression simple. Toutefois, il faut noter que les résultats de la compression simple sont plus objectifs.

TABLEAU 4.23 RÉSULTATS DES ESSAIS AUX ULTRASONS POUR LA POUSSIÈRE BROOKFIELD

E/M	20 (%)	25 (%)	30 (%)
VL(m/s)	1296,3	1504,2	1306,6
VT(m/s)	845,8	998,8	852,2
E (GPa)	2,7	4,2	3,2
ν	0,12	0,10	0,12

Pour vérifier si les critères de déformabilité sont respectés, des essais ont été réalisés selon la norme ASTM D3148-86. Deux cycles de chargement sont appliqués à l'échantillon afin d'obtenir la partie linéaire de la courbe effort-déplacement avec précision. Les valeurs des essais de compression simple avec des mesures extensométriques pour différentes teneurs en eau au malaxage, sont reportées au tableau 4.24. Les courbes τ - σ (Figure 4.15) obtenues sont relativement étalées. La déformation à la rupture augmente linéairement avec la teneur en eau. Les valeurs de la cohésion sont de 1,7 à 2,4 MPa et celles de l'angle de frottement interne sont de 15 à 18°.

TABLEAU 4.24 ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE AVEC MESURE EXTENSOMÉTRIQUE

Mélanges	E/M (%)	C_0 (MPa)	E (GPa)	$\Delta \varepsilon/\varepsilon$
Brookfield	20	5,1	4,4	0,6
	25	6,8	5,8	1,1
	30	4,3	4,1	1,7

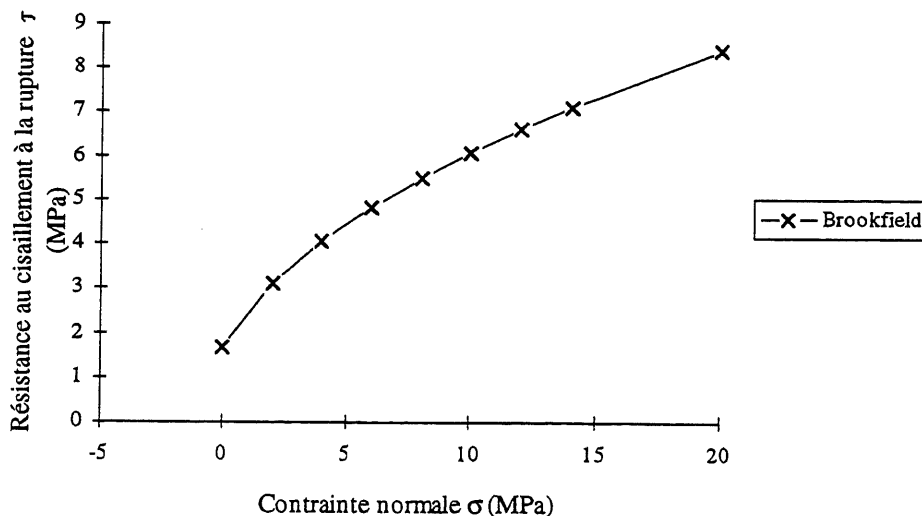


Figure 4.15 Représentation graphique du critère de Fairhurst pour Brookfield à 28 jours

4.4.3 Poussières de four de l'usine d'Alpena

Diverses préparations ont été effectuées en adoptant différents types de cendres volantes, de ciment. En effet, les ajouts minéraux utilisés sont de type F (Valley, River Rouge, Nanticoke, Presque Isle), type C (Pulliam, Edgewater, Presque Isle, Saint Clair), et ciment type 10.

Des essais Proctor normal ont été effectués en laboratoire pour définir les caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges. Les résistances à la compression simple et à la traction pour les mélanges avec Valley sont anormalement faibles [RHOZLANE, 1997]. Ces faibles valeurs sont probablement dues à leur pauvreté en chaux et en alcalis. Elles sont moins cimentaires. La cendre volante Valley présente une perte au feu d'environ 32% et 2,5% de CaO.

Le tableau 4.25 englobe les résistance à la compression des échantillons mûris à l'air humide, à 14 et à 28 jours. Les teneurs en eau, les masses volumiques et les résistances au pénétromètre y sont aussi présentées. On remarque que tous ces résultats sont supérieurs à 5 MPa.

TABLEAU 4.25 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES D'ALPENA + AJOUTS

Prélèvement	Mélange	E/M (%)	ρ_s (kg/m ³)	Pénétromètre (kg/cm ²)	C ₀ à 14 jours (MPa)	C ₀ à 28 jours (MPa)
Alpena 31/07/96	+10%Presque Isle Type C	30	1461	> 4,5	11,1	12,3
	+10% Presque Isle Type F	30	1348	> 4,5	10,2	14,7
Alpena 07/08/96	+10%Presque Isle Type C	30	1350	> 4,5	16,0	20,6
	+10% Presque Isle Type F	30	1350	> 4,5	12,9	13,8
Alpena 01/09/96	+10%Edgewater	30	1464	> 4,5	20,4	21,7
	+10%Nanticoke	30	1405	> 4,5	16,2	20,6
Alpena 13/06/96	+10%Pulliam	34	1384	> 4,5	10,9	16,3
	+10%Pulliam+2%Ciment	34	---	> 4,5	13,0	17,3
	+10%Nanticoke	38	1353	> 4,5	11,9	---
	+10%Nanticoke+2%Ciment	38	1353	> 4,5	11,9	---
	+10%River Rouge	36	1362	> 4,5	5,7	7,5
	+10%River Rouge+2%Ciment	36	1362	> 4,5	13,0	16,8

Les mélanges ont fait l'objet de caractérisations soniques. Les vitesses obtenues nous renseignent sur l'état de la structure de la matrice cimentaire des mélanges (fissures, porosité, etc.). Les vitesses sont élevées pour les mélanges compacts et homogènes. Les vitesses longitudinales rapportée dans le tableau 4.26 montrent que la valeur moyenne pour ce type de mélange est entre 1500 et 2100 m/s. Les résultats obtenus sont élevés.

TABLEAU 4.26 VITESSES LONGITUDINALES DES MÉLANGES D'ALPENA + AJOUTS

Mélange (Alpena 13/06/96)	Vitesse longitudinale (m/s)	
	à 14 jours	- à 28 jours
10%Pulliam	2475	2709
10%Pulliam+2%Ciment	2577	2780
10%Nanticoke	---	2545
10%Nanticoke+2%Ciment	---	2404
10%River Rouge	---	2375
10%River Rouge+2%Ciment	---	2858
10%Pulliam (après perméabilité)	---	1543

4.4.4 Synthèse de la caractérisation mécanique

L'utilisation d'ajouts minéraux, en remplacement d'une partie des poussières de four de cimenterie, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales.

Cette étude a montré que la chimie des CKD, la nature et la teneur des ajouts de stabilisation et le temps de mûrissement ont une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des mélanges. L'influence de la durée de mûrissement sur l'évolution des résistances montre une certaine augmentation puisqu'un facteur d'au moins 3 est obtenu pour la résistance à la compression après 56 jours de cure en chambre humide par rapport à 7 jours. Pour la même période, un facteur de 6 caractérise l'évolution de la résistance à la traction. Les tendances logarithmiques liant les résistances à la compression au temps de cure ont été établies.

Parmi les barrières testées, la poussière de four de cimenterie de Brookfield conditionnée par compactage et sans ajouts minéraux présente de bonnes caractéristiques mécaniques.

Un effet bénéfique se manifeste avec l'ajout de 2 à 5% en ciment type 10 au mélange K5+10%CV.

Il a été montré que l'ajout en bentonite contribue à l'amélioration de la ductilité des systèmes et que celle-ci peut être substituée par des argiles avoisinant les sites. La formulation optimale (K5+10%CV+3% bentonite) permet l'amélioration d'environ 30% de la déformation à la rupture du mélange (K5+10%CV).

4.5 Caractéristiques hydrauliques des mélanges développés

Les principaux objectifs de cette partie expérimentale sont la détermination de la perméabilité des mélanges développés, ainsi que son évolution avec le temps pour les différents scénarios: influence des rapports E/M, influence du compactage, influence du mode d'écoulement et de confinement des échantillons et influence des ajouts minéraux. Ces relations teneur en eau-compacité-perméabilité-temps sont essentielles pour la conception et la mise en oeuvre des barrières à base de poussières et d'ajouts minéraux pour le confinement des CKD.

Il faut donc mesurer la perméabilité des mélanges dans le but de la comparer au critère minimal prescrit par les réglementations de l'EPA et du MENVIQ, servant à la construction de lieux d'enfouissement et de stockage: $K = 10^{-7}$ cm/s

4.5.1 Influence des conditions expérimentales sur la perméabilité

En géotechnique, la mesure de la perméabilité se fait généralement à un degré de saturation total ($S_r = 100\%$). Les raisons qui conduisent à saturer les échantillons avant la mesure de la perméabilité sont d'une part, pour simuler les barrières fonctionnant à l'état saturé (fond de décharge) et d'autre part, parce que la perméabilité augmente avec le degré de saturation. Il existe plusieurs méthodes pour saturer les échantillons: par capillarité, sous charge hydraulique supérieure à la longueur de l'échantillon, sous vide et par contre-pression. En ce qui concerne cette étude, la saturation sous vide et la saturation par contre-pression ont été adoptées. À la fin de l'essai de perméabilité, le degré de saturation a été vérifié à l'aide de la formule:

$$S_r = \frac{W_f}{\left(\frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{G} \right)} \quad (4-1)$$

avec W_f : teneur en eau de l'échantillon mesurée à la fin de l'essai;
 ρ_s : masse volumique sèche de l'échantillon;
 G : masse volumique des grains solides

Pour les milieux imperméables, très souvent lorsqu'on veut mesurer la perméabilité à partir d'essai en laboratoire, les gradients hydrauliques sont habituellement plus élevés qu'in situ. Le gradient hydraulique rencontré in situ est généralement de l'ordre de 1 à 20. Cette différence

permet de réaliser des mesures dans un temps raisonnable. Il est possible que la différence des pressions entre l'amont et l'aval de l'échantillon entraîne sa consolidation donc une diminution de la perméabilité. En fait, cette possibilité n'est pas à craindre quand le matériau testé est un matériau compacté, car le compactage, même faible, correspond à des pressions statiques supérieures aux pressions hydrauliques utilisées au cours des essais de perméabilité. Ceci n'empêche pas de faire attention au claquage hydraulique. Comme indiqué au programme expérimental, deux types de perméamètres sont utilisés suivant la maniabilité des échantillons. Si les échantillons ont une perméabilité inférieure à 10^{-8} cm/s, une pression interne de 220 kPa et une contre-pression de 160 kPa sont appliquées. Sinon, la pression interne du perméant (eau distillée) est appliquée par une tête d'eau d'environ 2 m, variable jusqu'à 1 m. La pression externe reste nulle.

4.5.2 Résultats expérimentaux

La perméabilité est étudiée suivant deux modes d'écoulement et de confinement. Le premier mode détermine une perméabilité radiale divergente sans confinement latéral. Ce dernier est proche des conditions que l'on pourrait rencontrer in situ. Le second mode, qui détermine une perméabilité en mode longitudinal et dans un état confiné sur cellule triaxiale, donne, quant à lui, une borne inférieure à la perméabilité.

L'intégration du débit pour le mode d'écoulement radial divergent, pour une période de temps donné sur toute l'épaisseur de l'échantillon, donne:

$$K = \frac{V L_n \frac{R_e}{R_i}}{2\pi L_{eff} t dp} \quad (4-2)$$

où V : volume d'eau récoltée (m^3);
 t : temps de circulation (s);
 K : perméabilité du matériau (m/s);
 L_{eff} : longueur de la partie de la cavité sur laquelle s'effectue l'écoulement (m);
 R_e : rayon extérieur de l'échantillon (m);
 R_i : rayon intérieur de l'échantillon (m);
 dp : différentiel de pression entre les surfaces internes et externes du cylindre (m d'eau).

Cette formule donne en réalité une approximation de la perméabilité radiale. En effet, les lignes de courants dans la partie supérieure de l'échantillon ne sont pas contenues dans le plan transversal [NIEMANTS, 1981].

Les figures 4.16 à 4.23 montrent l'évolution de la perméabilité des mélanges préparés à différents rapport E/P et installés dans les cellules de perméamètres Bernaix modifiés. L'étude des caractéristiques hydrauliques des mélanges a permis de préciser les valeurs de perméabilité initiale et finale.

Il ressort que la perméabilité, en plus de la masse volumique sèche, est largement conditionnée par la quantité d'eau de malaxage. Cette constatation est vraie pour tous les mélanges développés.

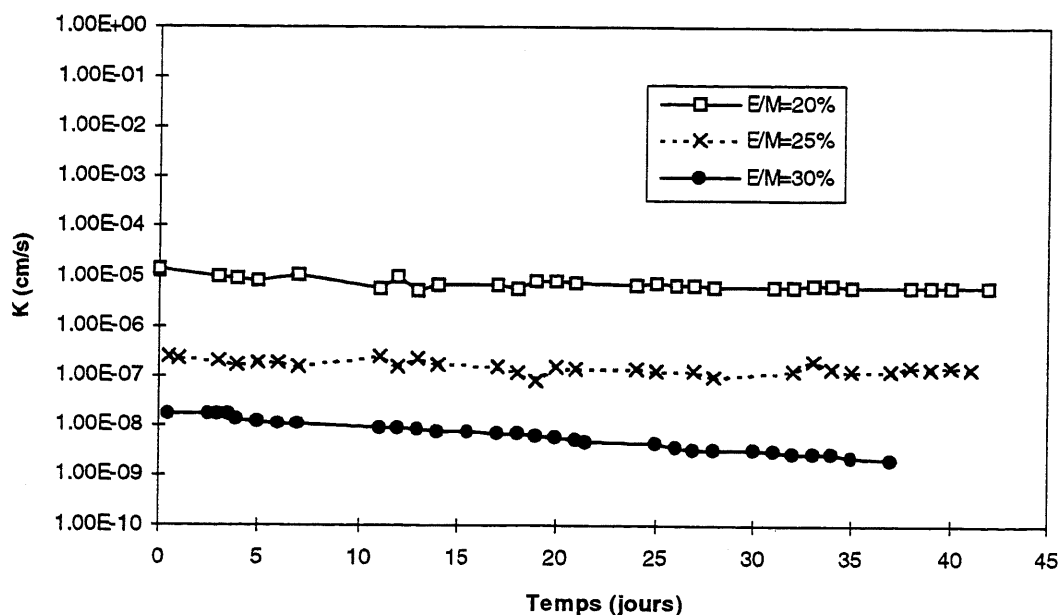


Figure 4.16 Évolution de la perméabilité du mélange Brookfield

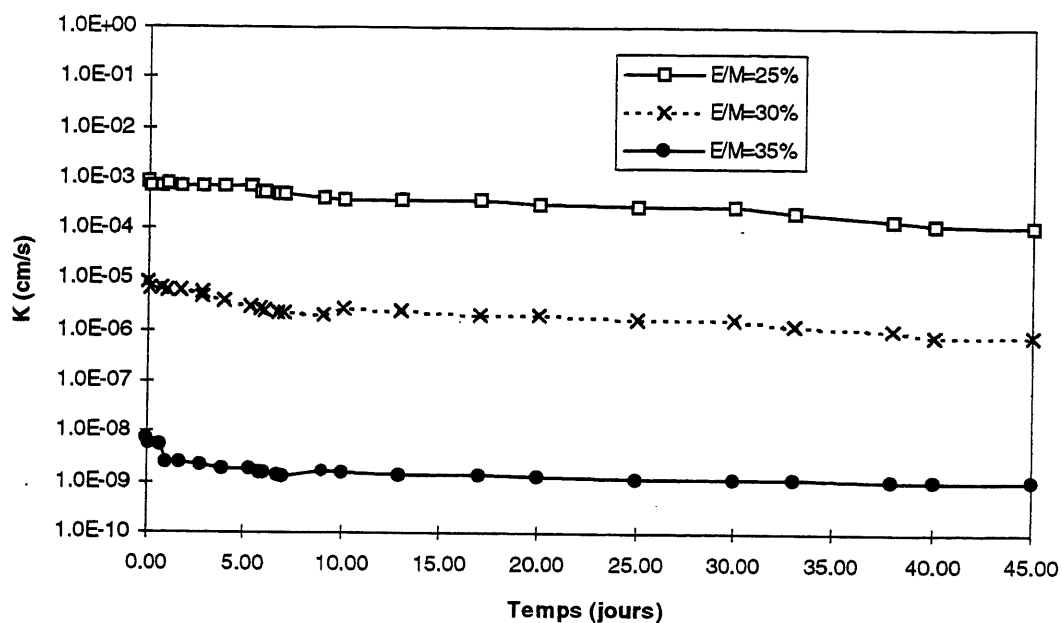


Figure 4.17 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw4+10%CV Saint-Clair

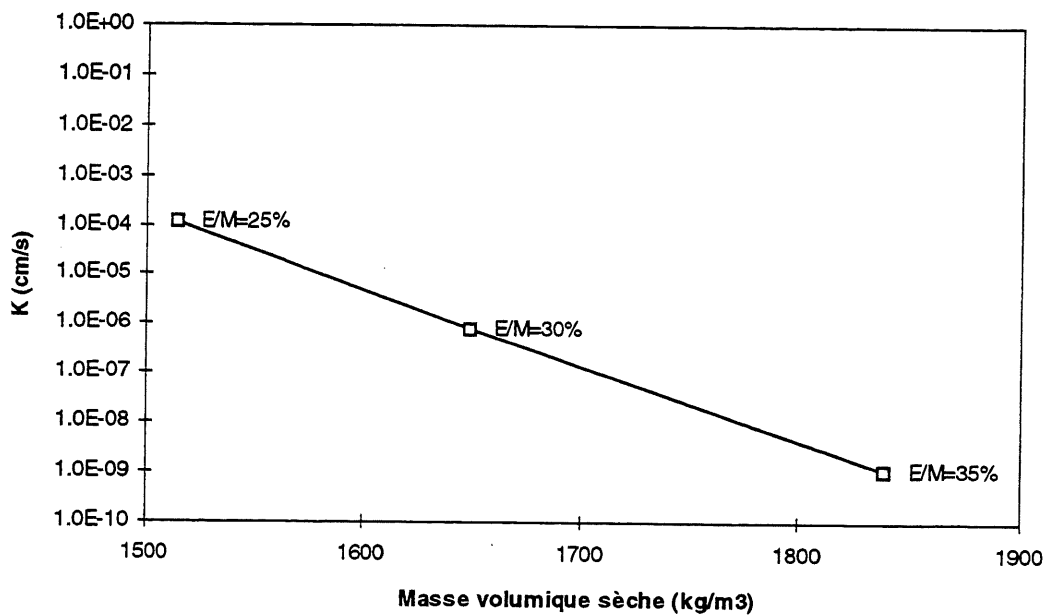


Figure 4.18 Évolution de la perméabilité en fonction de la masse volumique sèche du mélange Exshaw4+10%CV Saint-Clair

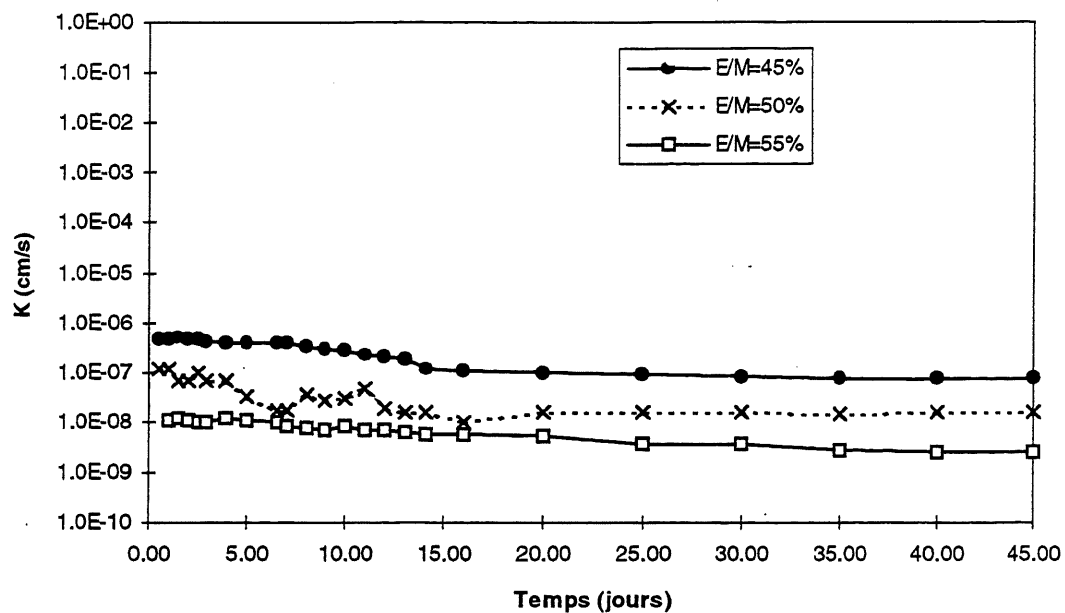


Figure 4.19 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV

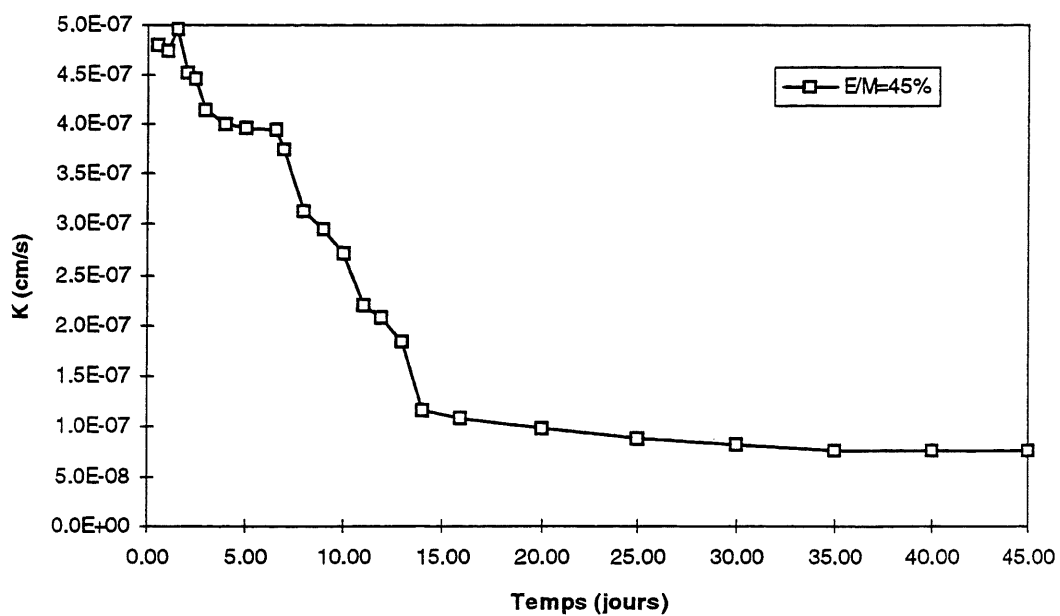


Figure 4.20 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=45%

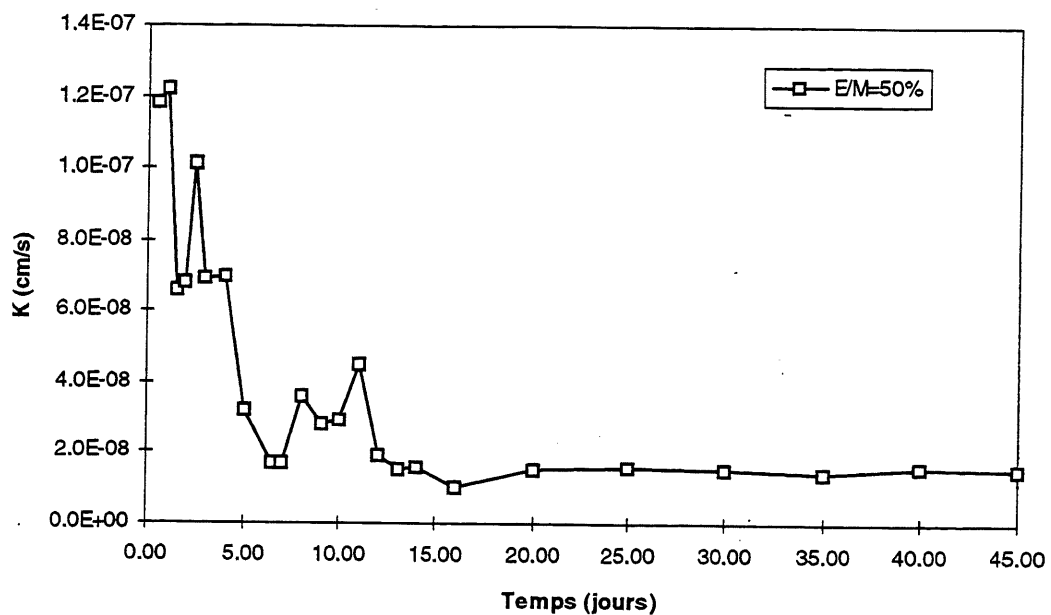


Figure 4.21 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=50%

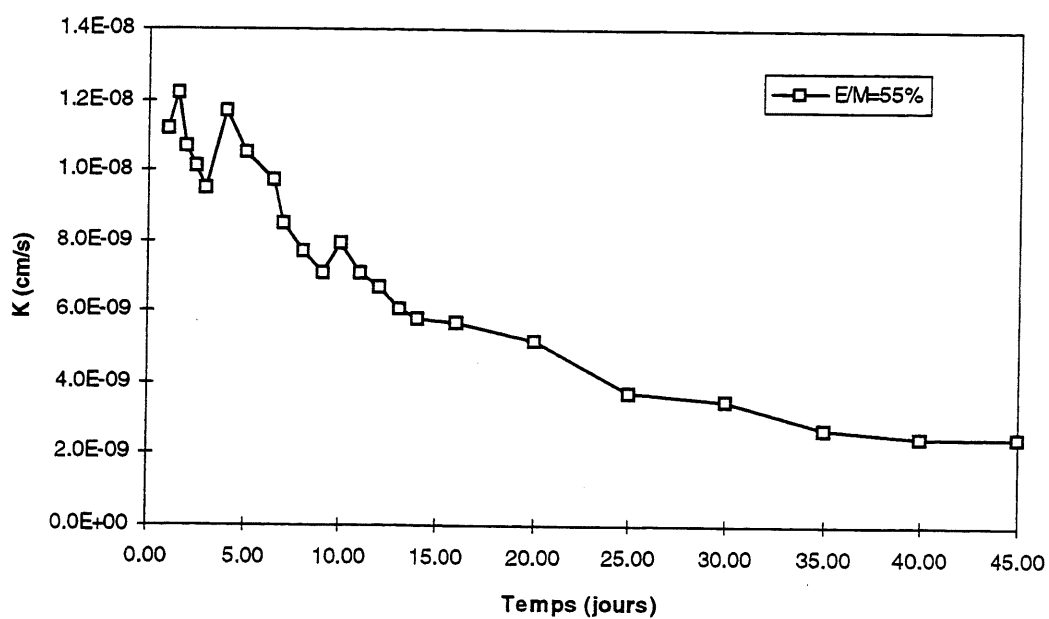


Figure 4.22 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV avec E/M=55%

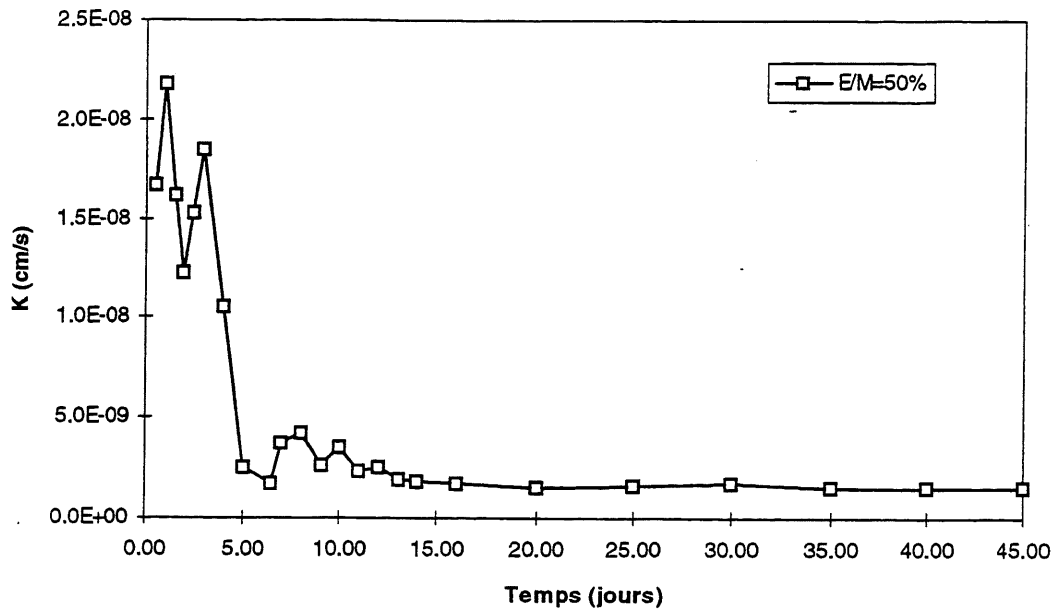


Figure 4.23 Évolution de la perméabilité du mélange Exshaw5+10%CV+2%C avec E/M=50%

Hormis l'échantillon Exshaw4+10%CV Exshaw, lors de la saturation et de l'immersion dans les cellules, les échantillons n'ont montré aucun signe de gonflement ou de fissuration. Une diminution régulière de la perméabilité est constatée avec le temps. Une diminution linéaire dans le cas d'une circulation radiale est typique, dans le cas des granites, ou de la formation de gel [BAUDRACCO, 1985].

Les coefficients de colmatage C_m et C_{max} sont égaux, ce qui signifie une diminution progressive de la perméabilité due à une réduction régulière de la porosité et à l'absence de phénomène de décolmatage par dissolution ou entraînement de particule. La baisse de perméabilité fait suite au colmatage dû à la continuation de l'hydratation des poussières ainsi qu'au dépôt de gel dans les interstices et les fissures.

Les coefficients de colmatage sont définis comme suit:

$$C = \frac{K_i - K_t}{K_i} \times 100 \quad (4-3)$$

où C : coefficient de colmatage (%);
 K_i : perméabilité initiale (m/s);
 K_t : perméabilité à l'instant t (m/s).

Le coefficient de colmatage moyen C_m est déterminé par:

$$C_m = \frac{K_i - K_f}{K_i} \times 100 \quad (4-4)$$

où K_f : perméabilité finale (m/s),

et le coefficient de colmatage maximal C_{max} :

$$C_{max} = \frac{K_i - K_{min}}{K_i} \times 100 \quad (4-5)$$

où K_{min} : perméabilité minimale mesurée au cours de l'essai (m/s).

Le tableau 4.27 donne les caractéristiques des courbes pour les divers cas de CKD.

TABLEAU 4.27 CARACTÉRISTIQUES DES PERMÉABILITÉS

Mélange	E/P	K_i (cm/s)	K_f (cm/s)	K_{min} (cm/s)	C_m	C_{max}
Exshaw5+10%CV+2%C	50	$1,67 \times 10^{-8}$	$1,50 \times 10^{-9}$	$1,50 \times 10^{-9}$	0,91	0,91
Exshaw5+10%CV	45	$4,81 \times 10^{-7}$	$7,50 \times 10^{-8}$	$7,50 \times 10^{-8}$	0,84	0,84
	50(opt)	$1,18 \times 10^{-7}$	$1,50 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-8}$	0,87	0,92
	55	$1,12 \times 10^{-8}$	$2,50 \times 10^{-9}$	$2,50 \times 10^{-9}$	0,78	0,78
Exshaw4+10%CV Saint-Clair	25	$8,20 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	0,86	0,86
	30	$9,10 \times 10^{-6}$	$8,00 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-7}$	0,91	0,91
	35(opt)	$6,93 \times 10^{-9}$	$1,06 \times 10^{-9}$	$1,06 \times 10^{-9}$	0,85	0,85
Brookfield	20	$1,38 \times 10^{-5}$	$5,80 \times 10^{-6}$	$5,01 \times 10^{-6}$	0,58	0,64
	25	$2,37 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-8}$	0,40	0,66
	30	$1,78 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-9}$	$1,30 \times 10^{-9}$	0,93	0,93

Il est ainsi possible d'obtenir des valeurs de perméabilité très faibles ($<10^{-9}$ cm/s), surtout du côté humide de l'optimum Proctor. En dessous de ce point, les valeurs des perméabilités sont beaucoup plus élevées et ne semblent pas dépendre de la densité ou de la teneur en eau.

Parmi les barrières développées, le mélange Exshaw5+10%CV+2%C montre dès le début une faible perméabilité.

En faisant varier la masse volumique de compactage et en gardant constant la teneur en eau lors d'essais de perméabilité sur des CKD, Todres et coll. (1992) ont observé que la perméabilité répondait à une relation linéaire inverse avec la masse volumique sèche. Dans notre cas, il semble que la teneur en eau joue un grand rôle en complétant les réactions d'hydratation et en diminuant la perméabilité.

Pour les poussières d'Alpena, on a réalisé des essais dans la cellule triaxiale conçue et réalisée au laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée. Les échantillons sont préparés à l'optimum Proctor et mûris dans la chambre humide pendant 14 jours. Les figures 4.24 à 4.26 montrent que la perméabilité décroît avec le temps pour tous les mélanges considérés. Les cendres volantes ont une influence sur la valeur finale K_f .

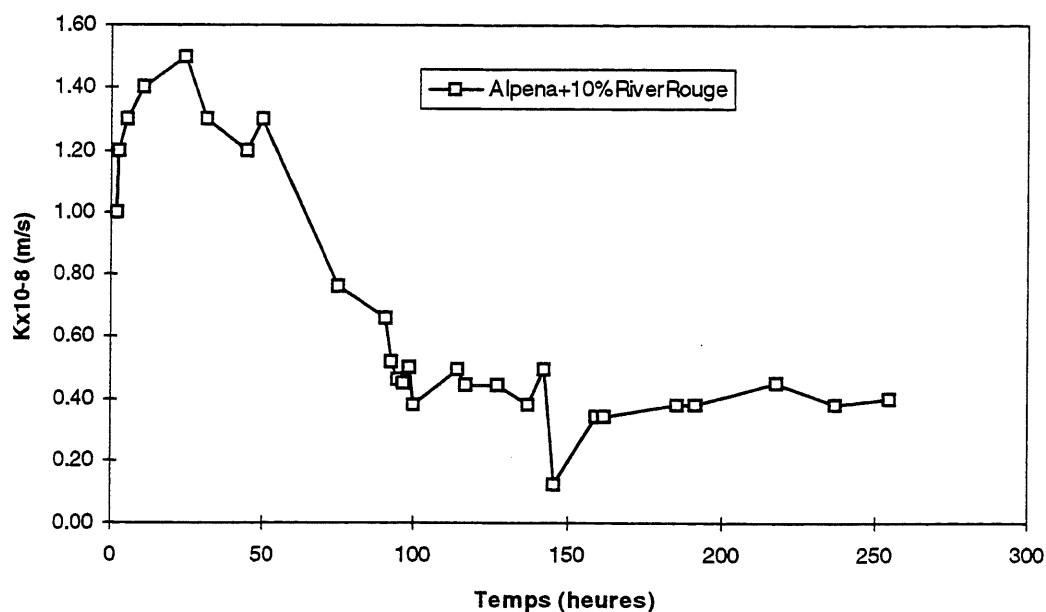


Figure 4.24 Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV River Rouge

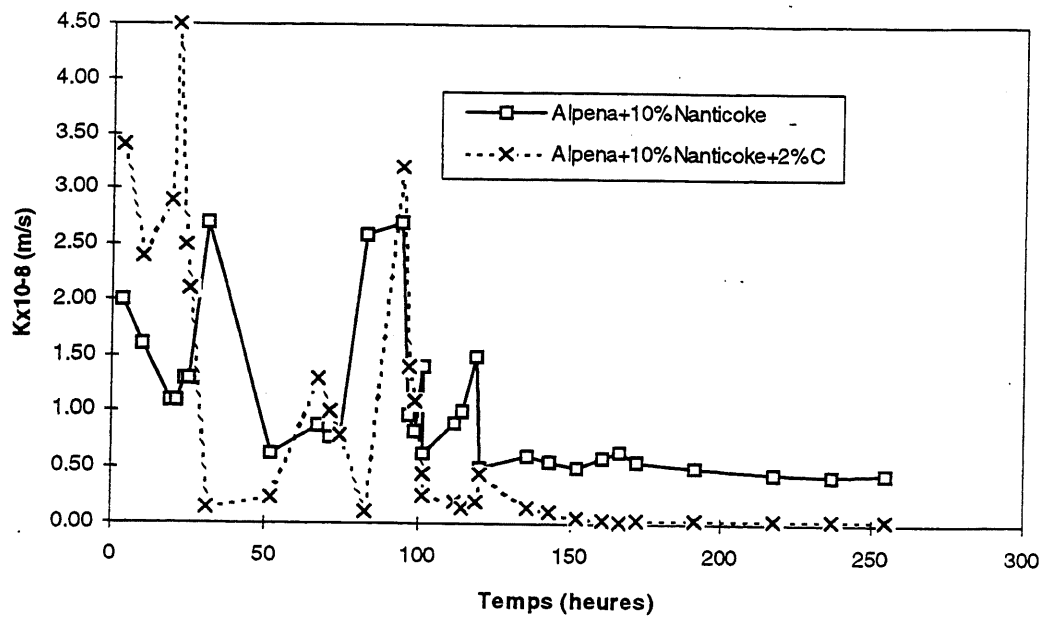


Figure 4.25 Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV Nanticoke

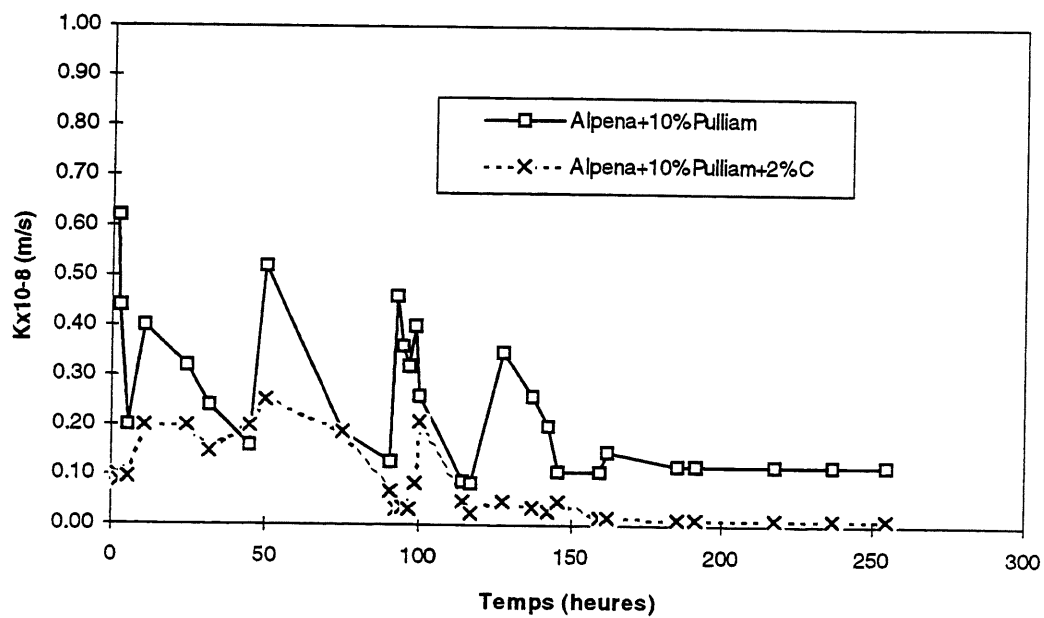


Figure 4.26 Évolution de la perméabilité du mélange Alpena+10%CV Pulliam

Les valeurs avancées dans cette étude témoignent les bonnes performances hydrauliques des barrières développées. En général, la perméabilité baisse linéairement avec le temps, et ce, dès le début de la circulation d'eau. L'analyse de cette évolution témoigne de la bonne longévité des barrières considérées et de l'absence de fissuration due à une éventuelle reprise de l'expansion. L'allure de la perméabilité en fonction de la teneur en eau montre que ce dernier paramètre conditionne l'étanchéité des barrières.

4.6 Caractéristiques environnementales des mélanges développés

4.6.1 Comportement au lessivage

L'étude du lessivage est réalisé selon deux modes. Le premier par l'application d'un gradient hydraulique qui assure la circulation de l'agent extractif à travers les pores de la matrice cimentaire. Le deuxième mode est la création d'un écoulement autour de l'échantillon.

La récupération des eaux de circulation permet l'analyse chimique des éléments lixiviables en fonction du temps, ce qui permettra la vérification de l'efficacité de certaines barrières développées.

Le tableau 4.28 résume les données de la littérature [PCA, 1992] sur les concentrations en éléments les plus significatifs pour différents CKD. Certains métaux dépassent les limites exigées par les normes de l'EPA et du MENVIQ.

TABEAU 4.28 CONCENTRATION DES ÉLÉMENTS TOXIQUES DANS LES CKD [PCA, 1992]

	Résultats TCLP - lixiviats des CKD			Total des métaux dans les CKD solides		
	Minimum (mg/l)	Moyenne (mg/l)	Maximum (mg/l)	Minimum (mg/kg)	Moyenne (mg/kg)	Maximum (mg/kg)
Mercuré	0,0002	0,0018	0,0223	0,004	0,660	25,50
Sélénium	0,006	0,152	1,1711	2,68	28,14	307,0
Thallium	0,01	0,38	4,50	1,40	43,24	776,0
Cadmium	0,0001	0,0288	0,2200	0,1	10,3	59,6
Plomb	0,002	0,349	9,718	34	434	7390,0
Antimoine	0,003	0,012	0,031	0,3	---	3,4
Argent	0,03	0,07	0,17	4,80	10,53	40,7
Arsenic	0,003	0,066	0,636	2	18	159,0
Nickel	0,06	0,13	0,32	1	22	60,0
Barium	0,12	1,04	9,19	35	172	767,0
Beryllium	0,0001	0,0004	0,0029	0,13	0,65	3,5
Chrome	0,01	0,10	1,29	8	41	293,0

En effet, à titre d'exemple, on constate que, selon les critères du MENVIQ, la concentration limite supérieure au-delà de laquelle des mesures de décontamination doivent être entreprises est de 1000 mg/kg, alors que la concentration du plomb dans les CKD peut atteindre 7390 mg/kg.

La limite admissible du TCLP (EPA) pour le plomb est de 5 mg/l alors que les résultats, présentés au tableau précédent, montrent que la concentration maximale est de l'ordre de 10 mg/l.

a) Lessivage au perméamètre

L'essai de lessivage effectué sur les perméamètres a concerné les mélanges K4+10%CV, K5+10%CV, K5+10%CV+2%C, Alpena+10%CV, Brookfield.

Le pH est l'un des paramètres les plus significatifs intervenant dans l'ensemble des réactions au sein de la matrice cimentaire, tout changement à ce niveau signifie une modification dans l'ensemble des processus de précipitation ou de stabilisation. La figure 4.27 montre la stabilité des quelques phases hydratées des produits cimentaires en fonction du pH. La rapidité et l'importance de ces réactions dépendent aussi, pour chaque composé, du produit de solubilité, de la vitesse d'écoulement de l'eau dans les pores et de sa température. Dans les cinq cas, le pH augmente dès les premiers jours de percolation pour se stabiliser à des valeurs très basiques de 12,2 pour K4+10%CV, 12,1 pour Brookfield, 12,2 pour Alpena+10%CV, 12,3 pour K5+10%CV+2%C et K5+10%CV. Les résultats (Figure 4.28) montrent que tout le long de la circulation, un pH voisin de 12. Ce pH élevé a un rôle important dans la longévité de ces barrières en poussières de four de cimenterie. Ceci traduit la persistance de forte alcalinité dans les solutions interstitielles, qui empêche la dissolution des composées de calcium (Figure 4.29). L'alcalinité est généralement exprimée en milligramme équivalent en CaCO_3 par litre.

Seule une basicité plus élevée peut entraîner l'hydrolyse et la lixiviation des éléments amphotères tel que l'aluminium. En effet et pour un rapport molaire $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+} > 3$, il peut y avoir formation d'espèces anioniques $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Les ions Ca^{2+} viennent de la dissolution de l'anhydrite (CaSO_4), la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), et l'ettringite. Ces réactions de dissolution existent dès le

début de l'hydratation des mélanges et rien ne peut les empêcher si les conditions nécessaires se présentent de nouveau après durcissement. Le pH reste élevé tant qu'il est tamponné par la portlandite. La concentration finale en calcium après environ 65 jours de circulation se situe à 710 mg/l pour K4+10%CV, 610 mg/l pour Brookfield, 1025 mg/l pour Alpena+10%CV, 1300 mg/l pour K5+10%CV+2%C et 1440 mg/l pour K5+10%CV. L'augmentation moins rapide du pH dans les mélanges permet d'augmenter les quantités consommées par les réactions de formation d'ettringite et du gel de CSH. La concentration des ions Ca^{2+} augmentent rapidement jusqu'au 26^e jour et se stabilise au delà pour K4+10%CV et Alpena+10%CV. Ils sont beaucoup plus lessivables pour ces deux mélanges que pour K5+10%CV+2%C et K5+10%CV (Figure 4.30). Dans tous les cas, les teneurs en calcium affichent une augmentation continue et régulière pour atteindre un pseudo-palier.

Rouis (1992) a montré que la réaction pouzzolanique dans le cas des CKD considérés est largement plus développée par rapport à la réaction d'expansion donnent les plus faibles valeurs de lessivage en calcium.

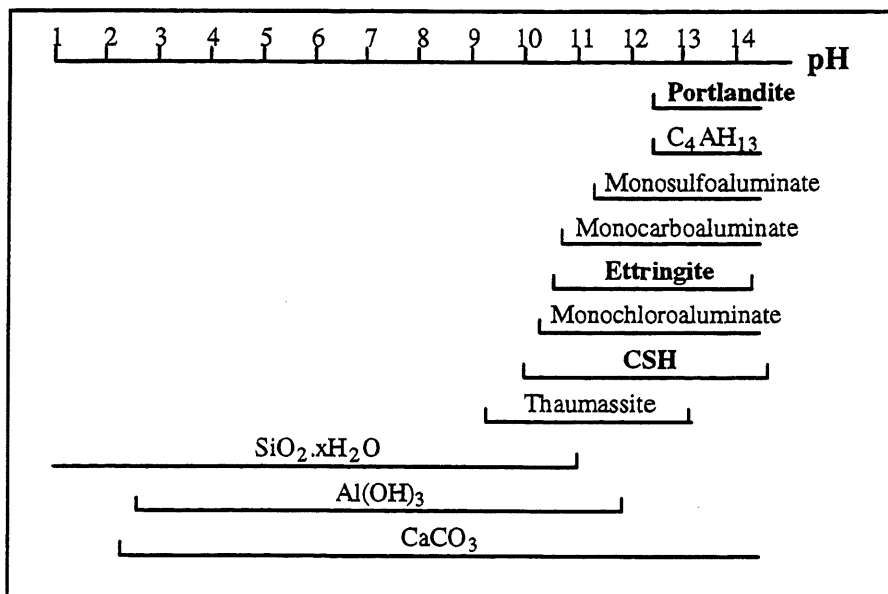


Figure 4.27 Stabilité des quelques hydrates en fonction du pH [BENZA AZOUA, 1997]

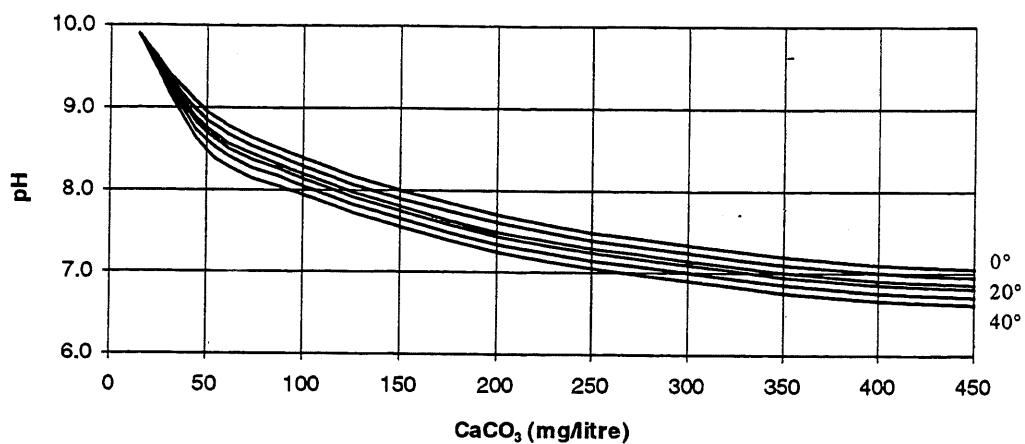


Figure 4.28 Stabilité de la calcite en fonction du pH et de la température

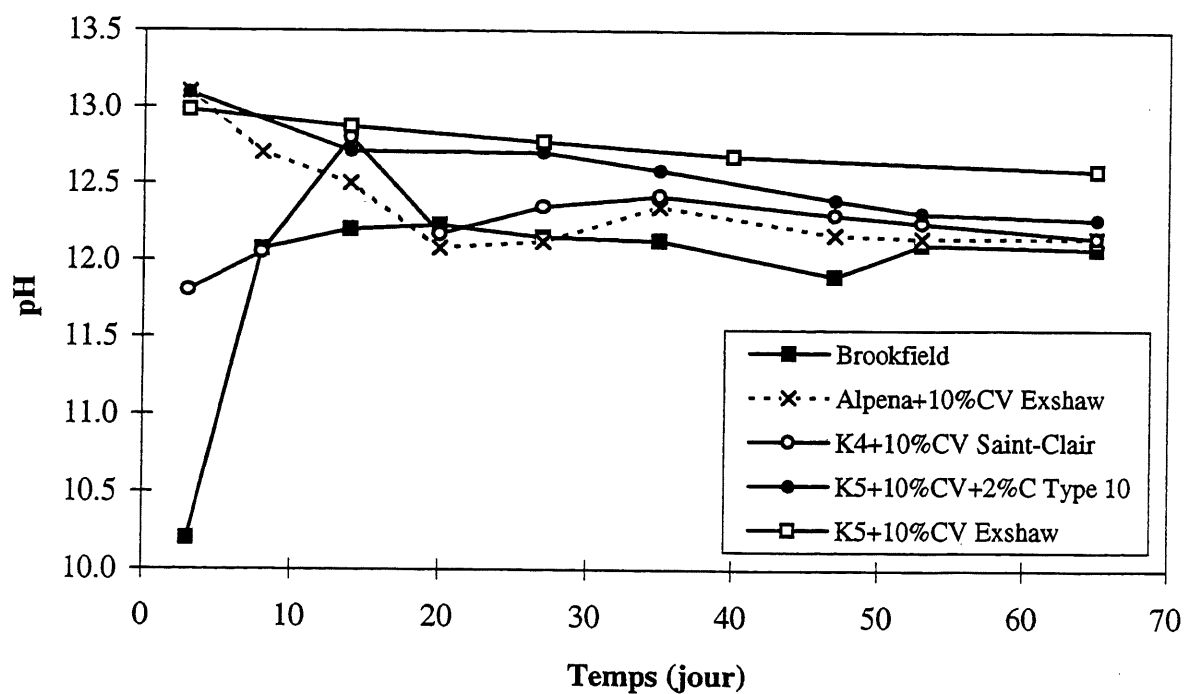


Figure 4.29 L'évolution des pH des lixiviats recueillis au perméamètre

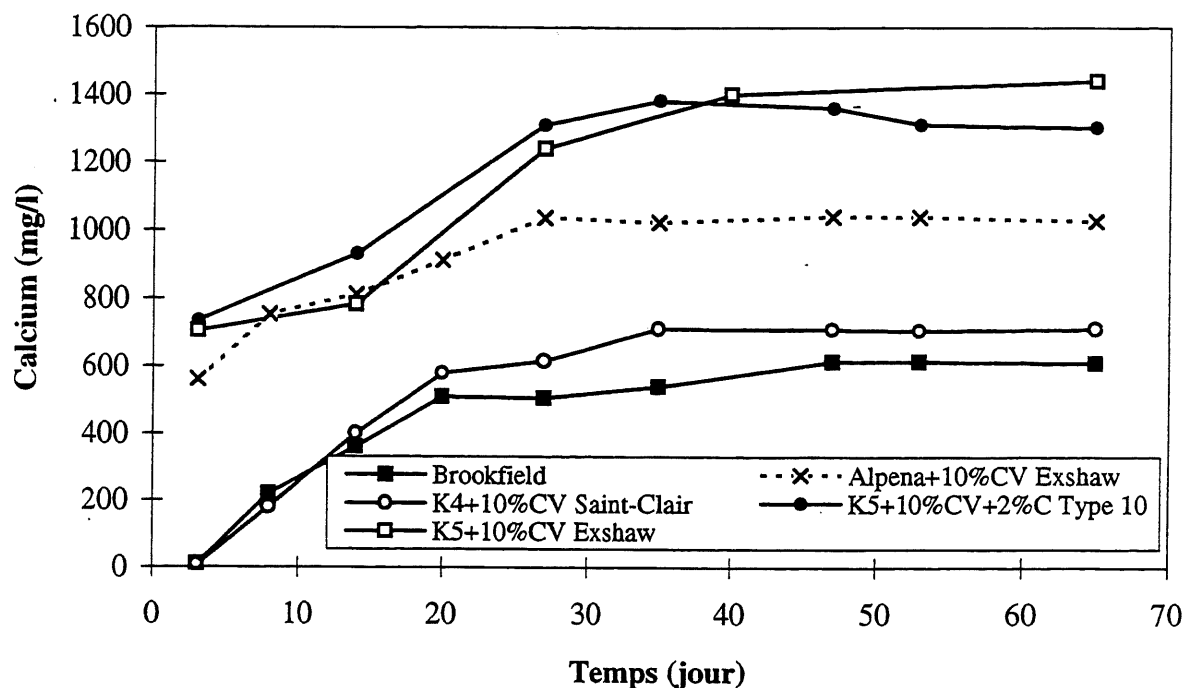


Figure 4.30 L'évolution de la concentration en calcium des lixiviats recueillis au perméamètre

Les ions Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , sont très peu lessivables car ils ne sont pas détectés dans le lixiviat. Leurs concentrations sont inférieures à la limite de détection par absorption atomique.

Les teneurs des alcalins (sodium et potassium) dans les eaux de circulation varient d'un mélange à un autre (Figure 4.31). Comme dans le cas du potassium, le lessivage de Na^+ augmente rapidement les premiers jours pour atteindre son maximum de concentration entre le 8^e et le 20^e jour. Par la suite, la concentration en alcalins diminue progressivement. Cette évolution est valable pour les échantillons Brookfield, Alpena+10%CV Exshaw et K4+10%CV Saint-Clair. Au contraire, les échantillons K5+10%CV+2%C et K4+10%CV Exshaw laissent apparaître une diminution régulière et continue dans le temps.

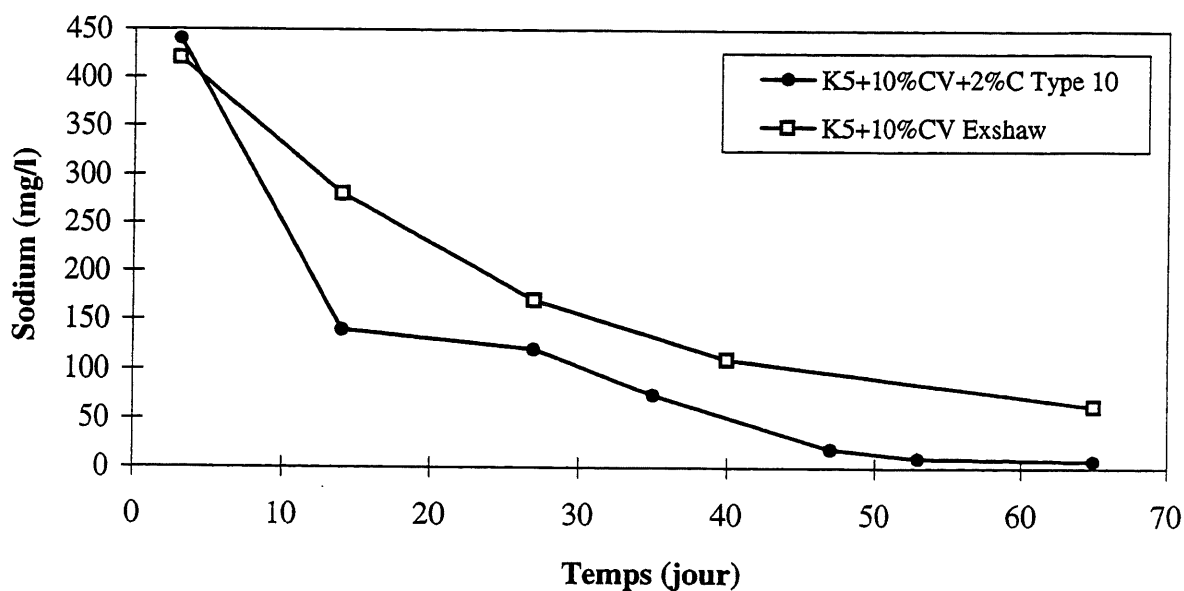
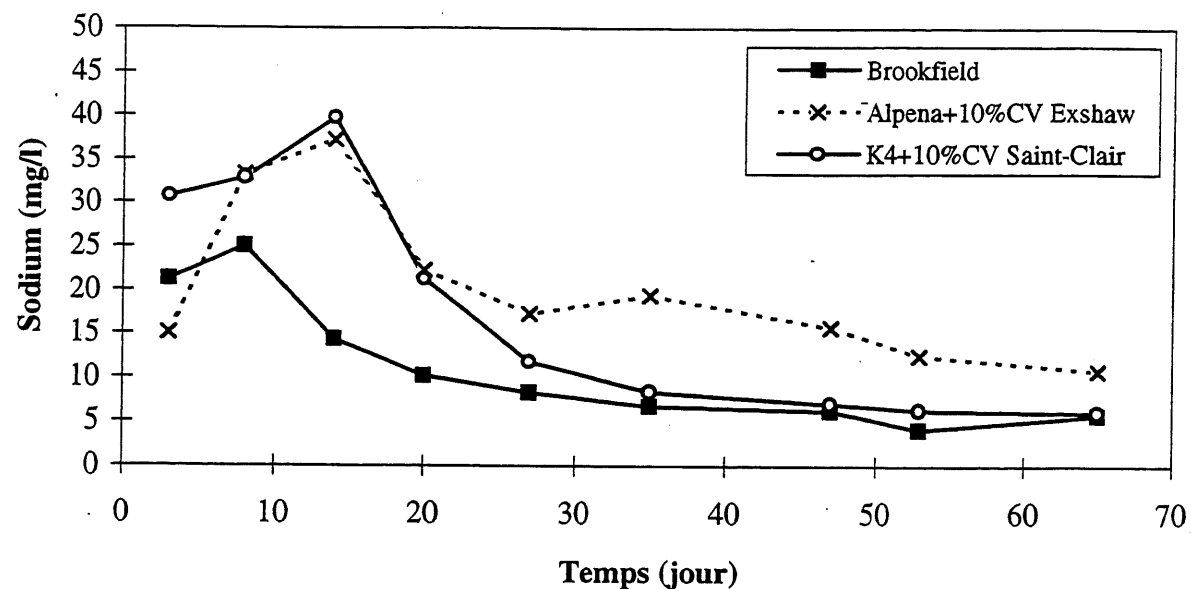


Figure 4.31 Évolution de la concentration de sodium des lixiviats recueillis au perméamètre

b) Lessivage dynamique par TCLP

Des essais de lessivage par TCLP ont été entrepris sur différents mélanges mûris à l'air humide pendant 28 jours. Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons des lixiviats sont reportées aux figures 4.32 et 4.33. Les mesures de conductivité et de pH ont été effectuées au centre technique et recherche de Lafarge et les autres déterminations au laboratoire

de Zénon environnemental, situé à Montréal. Le tableau 4.29 résume l'ensemble des résultats obtenus.

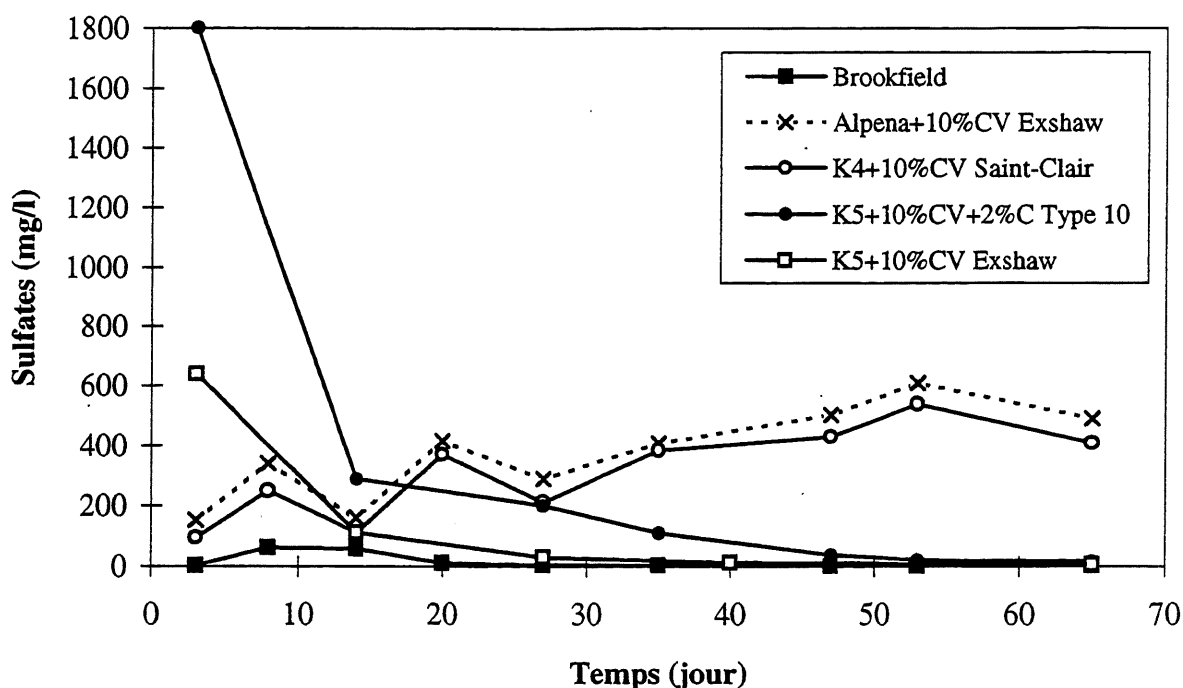


Figure 4.32 L'évolution de la concentration des sulfates des lixiviats recueillis au perméamètre

La figure 4.32 montre l'évolution des concentrations de sulfates des lixiviats recueillis au perméamètre. On observe que les concentrations du lixiviat du mélange à base de Brookfield est très faible. Le mélange K5+10%CV+2% présente une concentration de 1800 mg/l au départ qui s'atténue avec le temps.

Un échantillonnage, étalé sur deux ans et concernant les poussières d'Alpena, a subi des essais de lessivage par TCLP. La figure 4.33 montre l'évolution de certains de ces métaux. Aucun dépassement des normes en vigueur des concentrations de tous les métaux n'est relevé. Néanmoins, on peut remarquer que les filtrats des poussières d'Alpena sans ajouts présentent des concentrations plus élevées que ceux de la poussière conditionnée. Les résultats des mélanges à base de CKD et de CV Edgewater sont similaires à ceux à base de CKD et CV Nanticoke.

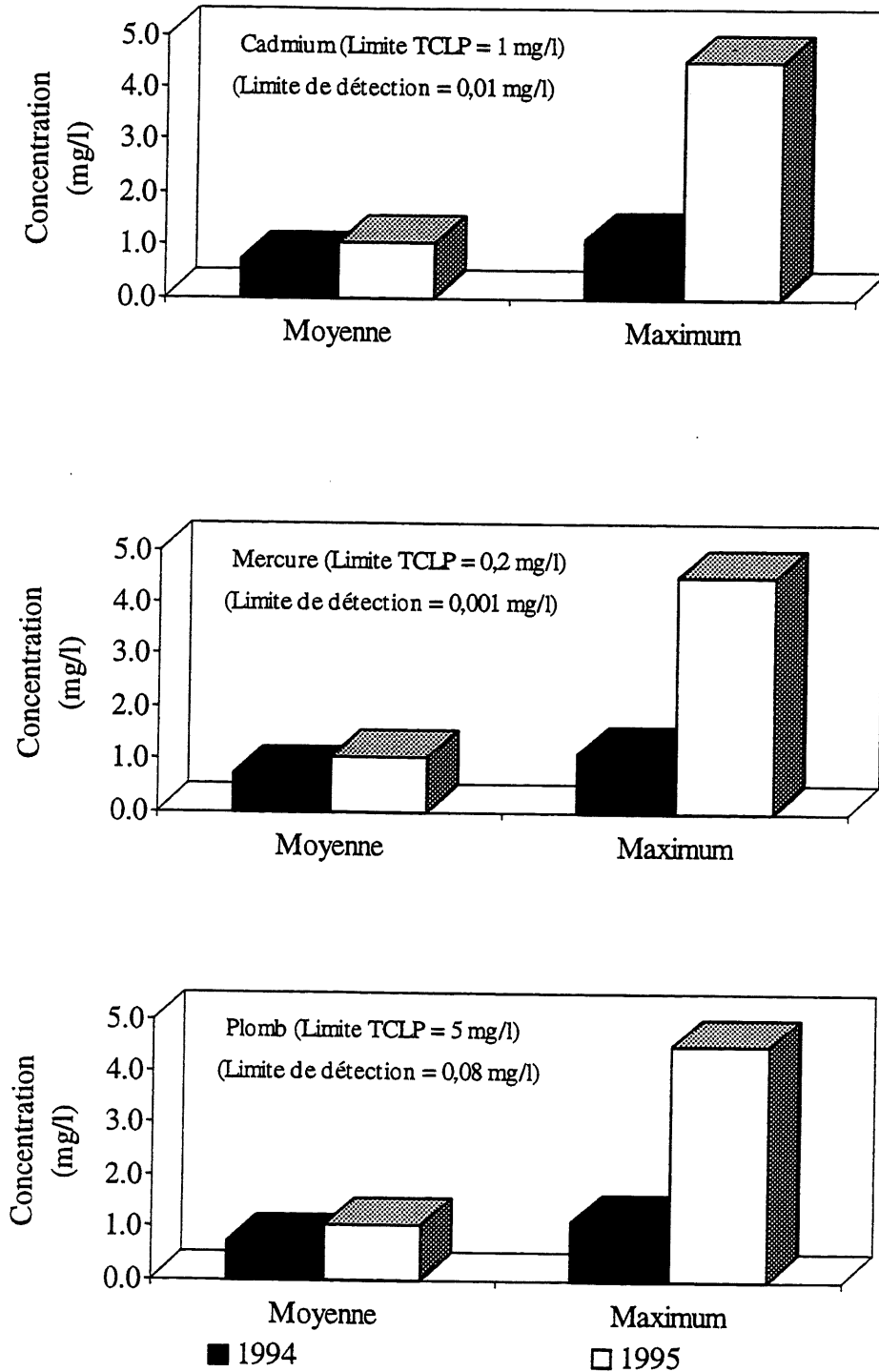


Figure 4.33 Concentrations de métaux lourds dans la poussière non conditionnée d'Alpena

Le tableau 4.29 montre les résultats des analyses physico-chimiques sur les lixiviats filtrés des mélanges à base de la poussière de four de la cimenterie d'Alpena et des ajouts minéraux. En général, les valeurs des métaux toxiques tels que le plomb, le mercure et le sélénium sont au dessous des valeurs exigés par les organismes environnementaux. La concentration en plomb dans le lixiviat est inférieure à 3 µg/l, celle du sélénium est inférieure à 5 µg/l, et celle du mercure est inférieure à 0,20 µg/l. Cette réduction de la lixiviation est le résultat de l'augmentation du pH à des valeurs très alcalines situées entre 12,2 à 12,5.

Le tableau 4.30 résume les éléments essentiels des filtrats avec les critères environnementaux et les limites de détection de l'appareillage. En ce qui concerne la poussière de four de cimenterie de Brookfield, on constate que le lixiviat a un pH de 12,2. Il paraît avoir des concentrations faibles en éléments chimiques, entres autres en sulfates, en alcalis, en calcium, en plomb et en mercure. Pour les autres barrières développées, les poussières conditionnées par compactage et ajouts minéraux présentent de très bonnes résistances au lessivage par rapport aux poussières seules, preuve supplémentaire de la stabilisation et de la consolidation des poussières de four par la présence de liants hydrauliques.

Les résultats de l'étude de lessivage au perméamètre ou par TCLP témoignent qu'une fois l'hydratation terminée, le lessivage correspond à un simple lavage des barrières des ions libérés ou restant en excès. Les mélanges considérés sont donc résistants au lessivage. Ce phénomène est dans tous les cas constant ou décroît avec le temps. Ce qui explique l'épuisement des éléments lixiviables et traduit une bonne longévité des mélanges. En ce qui concerne les teneurs en plomb, les résultats montrent que, peu importe le mélange choisi, les concentrations sont inférieures à 5 ou 6 mg/l, teneurs respectant tout à fait les normes établies en Amériques du Nord.

TABLEAU 4.29 CONCENTRATION DES MÉTAUX PAR TCLP DES MÉLANGES ALPENA

Paramètre	Critère	Alpena	10% P ⁽¹⁾	10% P + 2%C ⁽²⁾	10% RR ⁽³⁾	10% RR + 2% C	10% N ⁽⁴⁾	10% N + 2% C
Alcalinité (mg/l)	---	2 800	370	380	450	400	460	640
Fluor (mg/l)	2,10	---	0,88	0,88	0,76	0,86	1,00	1,20
T.D.S. (mg/l)	---	6 100	1 300	1 200	1 400	1 100	1 500	1 700
Sulfates (mg/l)	---	1 700	270	270	310	290	320	410
Calcium (µg/l)	---	1 200 000	120 000	110 000	110 000	110 000	150 000	170 000
Chrome (µg/l)	120	20	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Plomb (µg/l)	4,0	46,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
Magnésium (µg/l)	---	---	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500
Mercure (µg/l)	2,10	L.D. ^(*)	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Potassium (µg/l)	---	1 000	390 000	370 000	360 000	360 000	430 000	580 000
Sélénium (µg/l)	35,0	9,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	8,5	< 5,0
Sodium (µg/l)	150 000	64 000	48 000	37 000	44 000	25 000	54 000	33 000
pH	---	12,5	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,5

(1) P: Pulliam

(2) Ciment (type 10)

(3) RR: River Rouge

(4) N: Nanticoke

(*) L.D.: Limite de détection

TABLEAU 4.30 CONCENTRATION DES MÉTAUX LOURDS PAR TCLP DES MÉLANGES EXSHAW ET BROOKFIELD

Paramètre	Critère (EPA)	Limite de détection	K4	K5	Brookfield	K4+10%CV	K5+10%CV	K5+10%CV+2%C
pH (20°C)	---		12,52	12,71	12,21	12,11	11,57	11,12
Conductivité (µs/cm)	---	1	16 000	24 000	8 200	4 210	1 460	850
Alcalinité (mg/l)		1	2 800	2 900	1 500	730	310	210
T.D.S. (mg/l)		10	5 200	7 400	2 200	2 100	660	480
Plomb (mg/l)	5 mg/l	0,005	0,018	<	0,012	<	<	<
Sodium (mg/l)		0,4	65	120	22	82	<	<
Mercure (mg/l)	0,2 mg/l	0,0002	0,0006	0,0003	<	<	<	<
Sélénium (mg/l)	1 mg/l	0,001	0,002	0,3	0,002	<	0,017	< 0,01
Potassium (mg/l)		2	730	2 900	360	700	180	150
Manganèse (mg/l)		0,005	<	< 0,01	<	<	< 0,05	<
Calcium (mg/l)		0,02	1 200	380	520	95	62	34
Chrome (mg/l)		0,02	<	0,93	0,02	<	< 0,2	<
Sulfates (mg/l)		0,2	1 400	600	210	510	230	220
Chlorures (mg/l)		0,2	110	390	220	230	45	33

4.6.2 Comportement à la diffusion

Cette partie présente l'évaluation de l'efficacité environnementale en termes de concentration de contaminants traversant la barrière. Ce qui permettra de juger l'impact sur le milieu environnant et, en particulier, sur les eaux souterraines. Cette efficacité est définie par une période de mise à l'épreuve de 30 ans sans passage de contaminant et un rapport C/C_0 ne dépassant pas 0,8 après 150 ans de service.

À partir d'essai de laboratoire, les paramètres de simulation exigés par le modèle numérique de Rowe et Booker (1996) pour la prédiction de la migration des contaminants à travers les barrières étudiées ont été déterminées. Le tableau 4.31 résume toutes les données nécessaires pour cette étude de l'efficacité environnementale, à savoir:

- la perméabilité, la masse volumique sèche et la porosité;
- la hauteur du lixiviat au dessus de la barrière;
- la concentration initiale du contaminant et sa variation au cours du temps;
- les conditions d'écoulement et de transport aux limites supérieures et inférieures de la barrière;
- les paramètres de distribution K et de diffusion D;
- le pH au-dessus de la barrière.

TABLEAU 4.31 PROPRIÉTÉS DES MÉLANGES POUR ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

	Perméabilité (cm/s)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Hauteur de lixiviat (cm)	pH lixiviat 0-24h	mode d'écoulement
K5+10%CV	$1,5 \times 10^{-8}$	1400	15	7-12	diffusion
K5+10%CV+2%C	$1,5 \times 10^{-9}$	1434	15	7-12	diffusion
Brookfield	$1,2 \times 10^{-8}$	1571	15	7-12	diffusion
K5+10%CV	$1,5 \times 10^{-8}$	1400	15	7-12	advec./diffu.
K5+10%CV+2%C	$1,5 \times 10^{-9}$	1434	15	7-12	advec./diffu.
Brookfield	$1,2 \times 10^{-8}$	1571	15	7-12	advec./diffu.

Aucun gonflement, ni fissuration significatifs n'ont été relevés après test. En ce sens et après 67 jours d'essais, aucun écoulement d'eau n'a été décelé dans les dispositifs munis de chambre de collecte de lixiviat. Une grande variation de la concentration en cadmium est enregistrée dès le premier jour. En effet, de 1500 mg/l la concentration baisse à 11,5 mg/l. Ce

comportement est enregistré pour tous les types de mélanges testés. Cette baisse de la concentration en cadmium s'explique par une précipitation de l'hydroxyde de cadmium à la suite de l'élévation du pH de la solution (Figure 4.34). Cette élévation est due à une dissolution de portlandite provenant de la barrière dans la solution source.

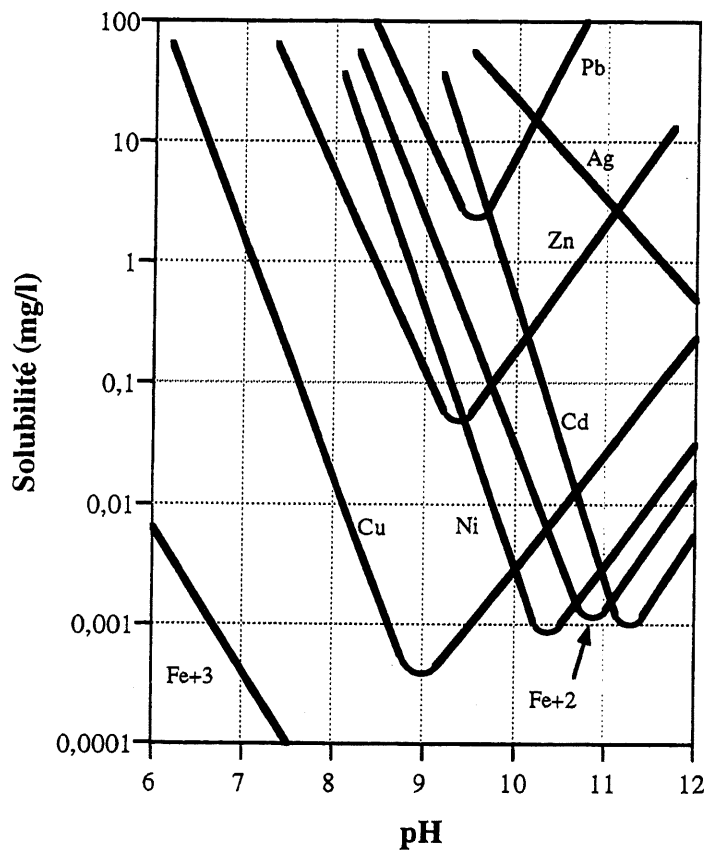


Figure 4.34 Diagramme de solubilité des métaux en fonction du pH [PCA, 1991]:

En effet, le pH des solutions au-dessus des barrières augmente de 7 au premier jour à 11,5 à 7 jours, pour se stabiliser ensuite entre 11,5 et 12. Le cadmium de ce fait, a de très faibles concentrations en fonction de la profondeur. Le cadmium ne pénètre pas au sein des barrières. Ce qui est confirmé par les analyses chimiques. Rouis [1992] a noté dans ses recherches que des essais, effectués sur les barrières à base de poussières de four stabilisées développées avec des solutions contenant du plomb et chlorure ont montré le même comportement dans le cas de cadmium. Cela prouve que la forte alcalinité constitue un système d'autoprotection qui bloque la migration par diffusion des métaux en provoquant leur précipitation au-dessus de la barrière et, dans le cas ultime, au sein des pores de la barrière.

La concentration des ions chlore, après 67 jours de circulation, peut atteindre 500 mg/l. Les concentrations obtenues de façon expérimentale sont concordantes avec celles simulées avec différents coefficients de diffusion, indiqués sur les figures 4.35 à 4.37, selon le type de mélange considéré. Ces concentrations calculées par le modèle théorique ont été obtenues avec un coefficient de distribution nul traduisant le caractère conservatif des ions chlorures dans ces barrières de poussières de four stabilisées. Par ailleurs, les concentrations obtenues de façon expérimentale sont concordantes avec celles calculées pour les barrières en argile. Néanmoins, une certaine appréhension peut surgir quant à l'application des ions chlorures comme traceur puisqu'une interaction chimique de ces ions avec la phase majoritaire de la portlandite est très plausible.

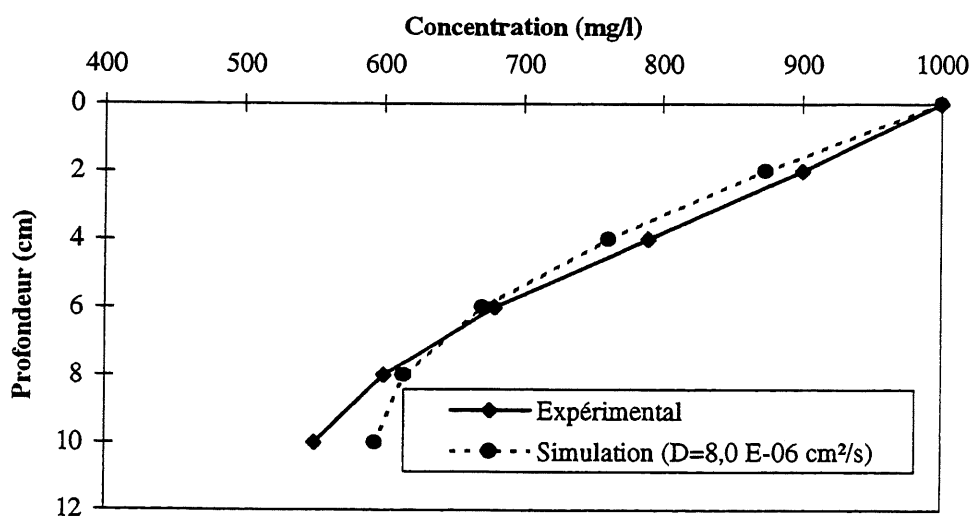


Figure 4.35 Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières K5+10%CV

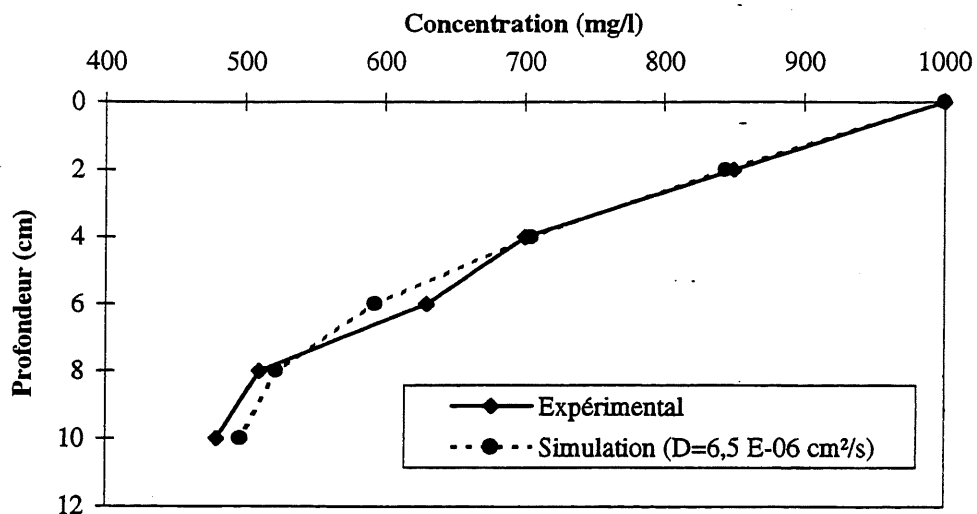


Figure 4.36 Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières K5+10%CV+2%C

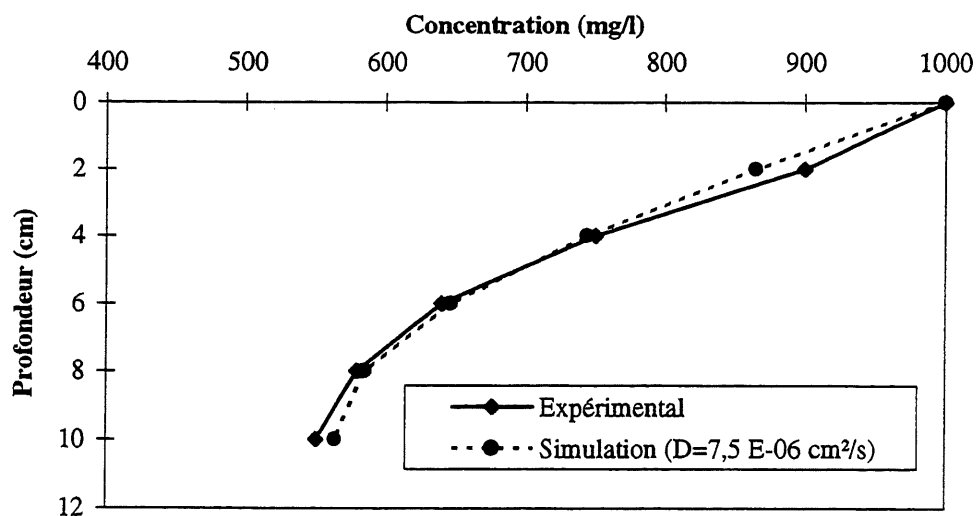


Figure 4.37 Variation de la concentration en chlorures au sein des barrières Brookfield

Pour l'évaluation du temps au-delà duquel la barrière perd totalement son rôle d'écran atténuateur, nous avons réalisé des simulations par le modèle numérique de Rowe et Booker [ROWE et BOOKER, 1996, OGATA, 1970] (Figures 4.38 à 4.41). Les paramètres de simulation

ont été choisis en fonction du mode de transport des contaminants dans les barrières de poussières de four de cimenterie stabilisées et la nature des lixiviats des déchets domestiques.

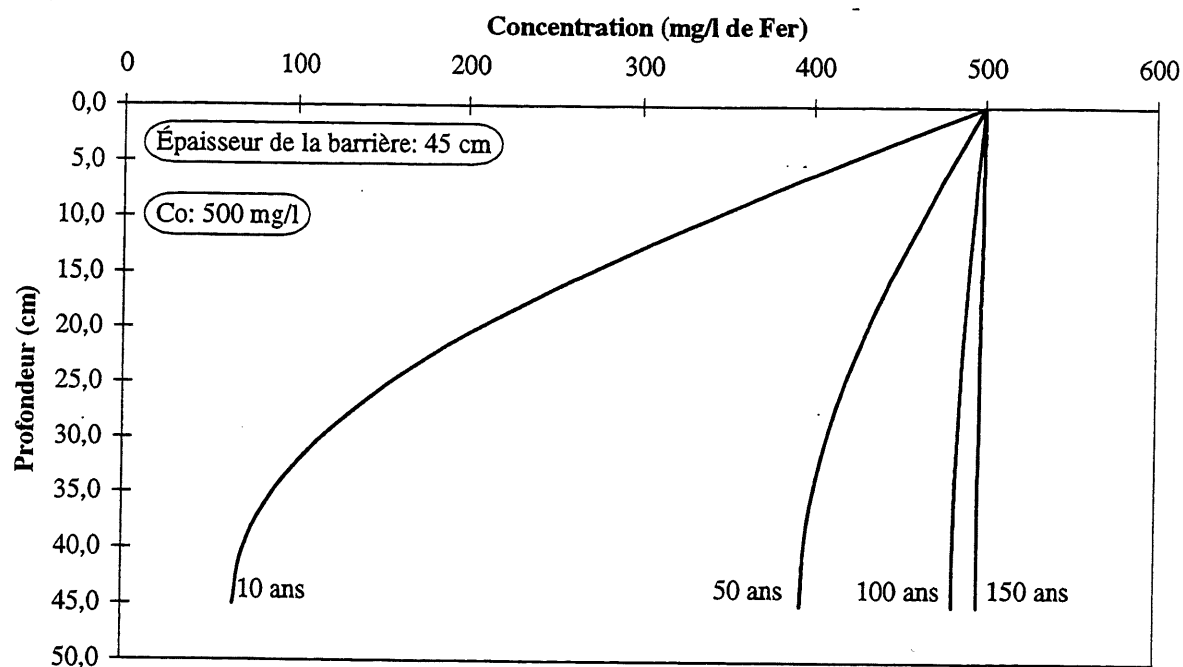


Figure 4.38 Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 45 cm

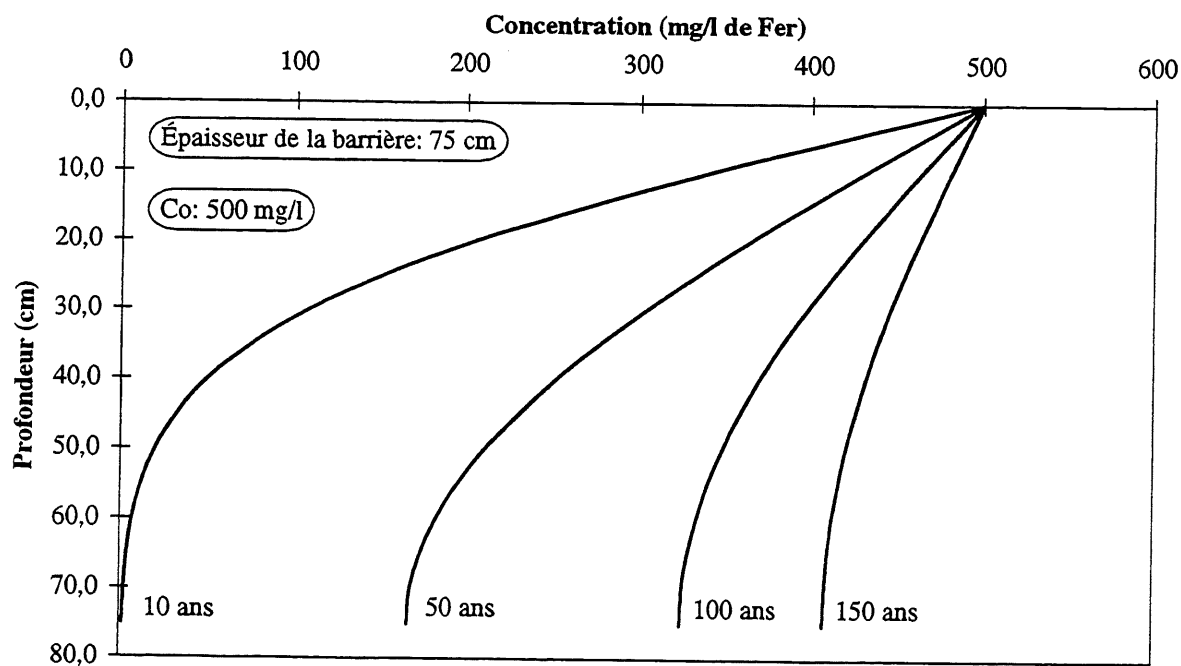


Figure 4.39 Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 75 cm

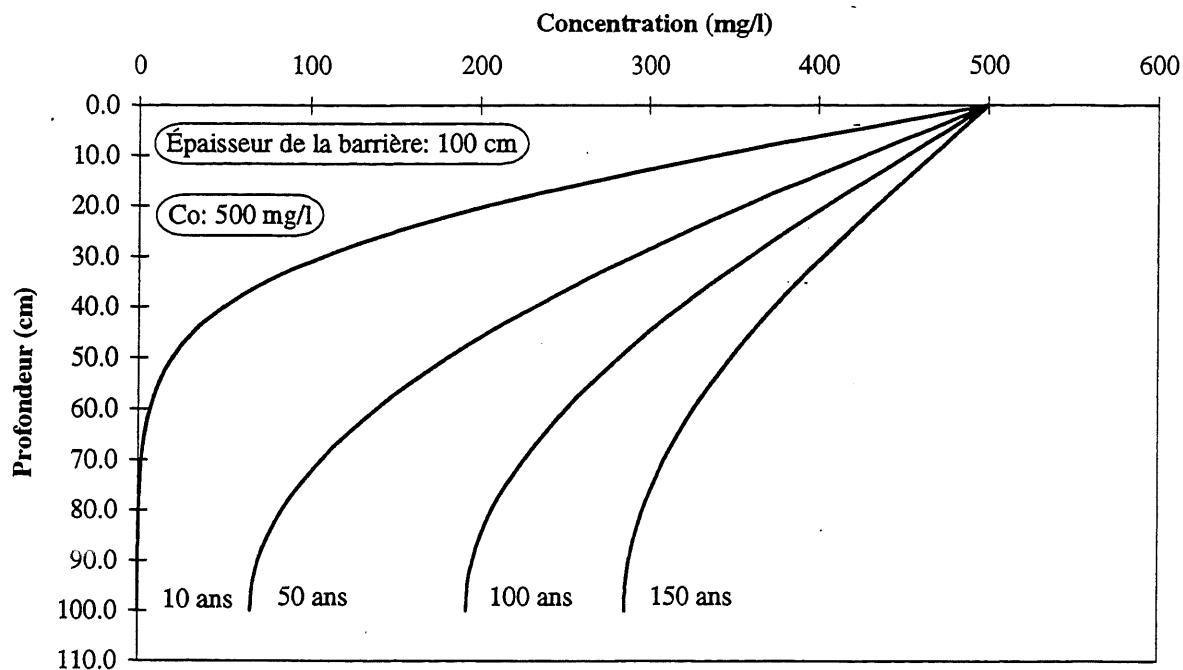


Figure 4.40 Évolution des concentrations au sein de la barrière K5+10%CV 100 cm

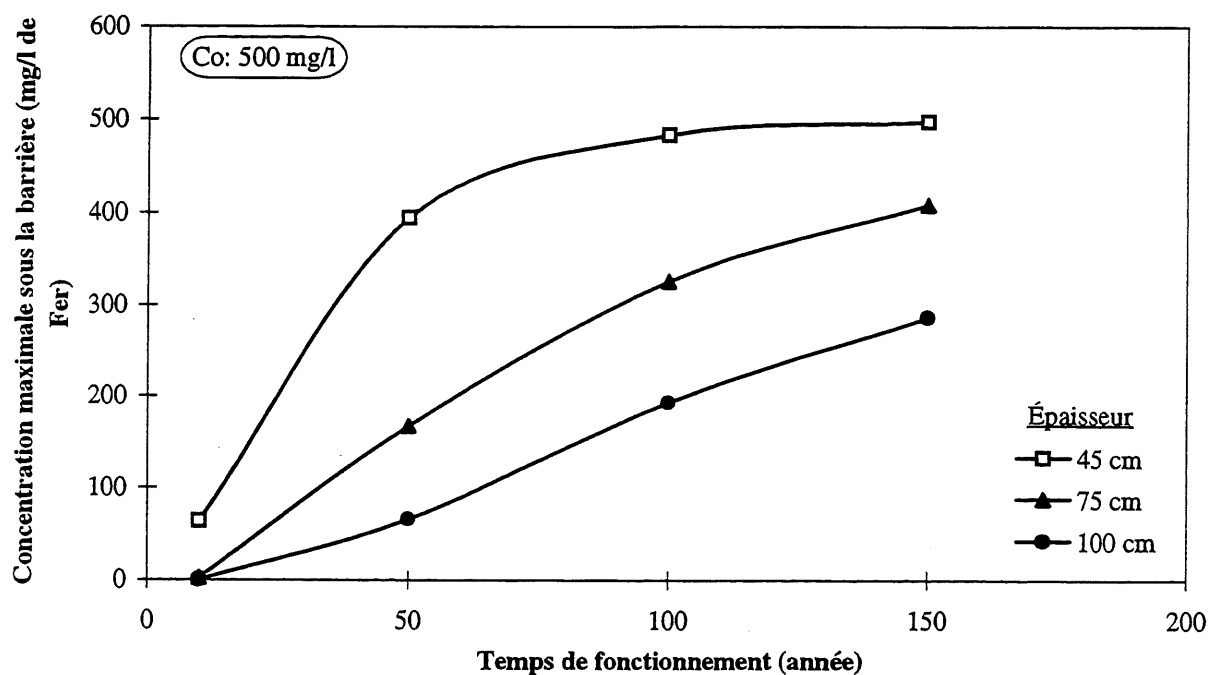


Figure 4.41 Évolution des concentrations maximales sous la barrière K5+10%CV à différentes épaisseurs

Le fer a été choisi comme contaminant pour toutes les illustrations des simulations présentées. Ce choix est dicté par les constatations suivantes [ROUIS, 1992]:

- il représente le métal dont les concentrations sont les plus élevées dans les lixiviats des déchets domestiques;
- sa diffusion dans les solutions libres est comparable à celle des métaux lourds toxiques comme le plomb et les métaux de transition tels que le cadmium et le cuivre [QUIGLEY et coll., 1987];
- son comportement dans des milieux à forte alcalinité est comparable à celui des métaux lourds toxiques [BRADSHAW, CHADWICK, 1980].

Une concentration initiale $C_0=500$ mg/l est choisie et elle correspond aux concentrations maximales en fer habituellement rencontrées dans les lixiviats des sites d'enfouissement [SHOIRY, 1985].

Par référence à la classification des domaines d'application des différents modes de transport présentée à la figure 4.42 [ROWE, 1987], toutes les perméabilités et les vitesses d'écoulement dans les barrières développées indiquent que le transport des contaminants s'effectue essentiellement par diffusion et advection. La dispersion mécanique est ainsi négligeable.

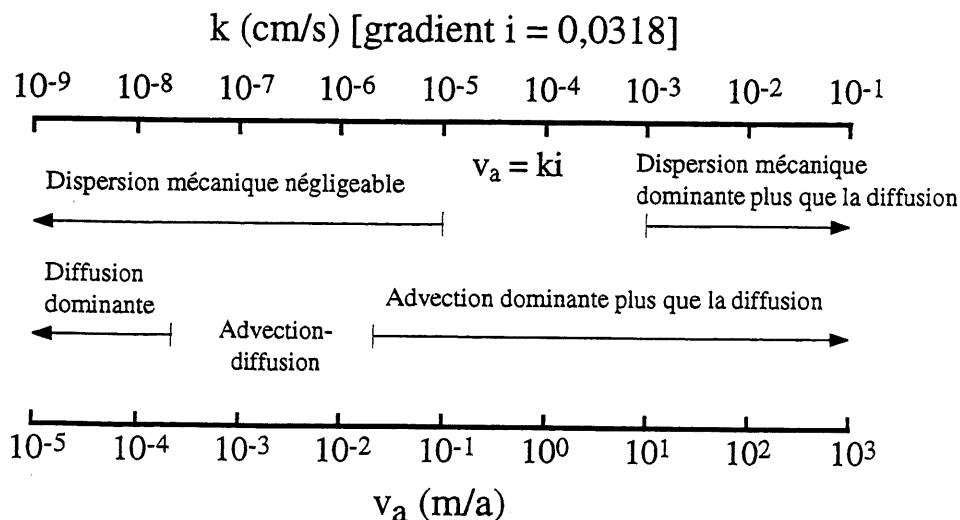


Figure 4.42 Domaines d'application des différents modes de transport des contaminants [ROWE, 1987]

Le coefficient de dispersion hydrodynamique

$$D = D_e + D_m = D_e \quad (4-6)$$

où D_e : diffusion effective;
 D_m : dispersion mécanique.

La diffusion effective peut être calculée à partir de l'expression

$$D_e = \tau D_o \quad (4-7)$$

où D_o : coefficient de diffusion dans les solutions libres (m^2/an);
 τ : paramètre empirique appelée tortuosité.

La tortuosité exprime la lenteur de la diffusion d'un élément donné dans le milieu poreux comparée à sa diffusion dans une solution libre. Cette lenteur est due uniquement à ce que le cheminement de cet élément entre deux points donnés du milieu poreux est non linéaire (mouvement Brownien). Barone et ses collaborateurs (1990) ont montré que la tortuosité varie de 0,095 à 0,108 dans le cas du schiste argileux intact pour différents contaminants. Une tortuosité de 0,1 a été prise en considération dans les simulations de la présente étude, ce qui a conduit à un coefficient de dispersion $D=0,027 \text{ m}^2/\text{an}$.

Rouis (1992) a présenté dans son étude bibliographique certains travaux relatifs au coefficient de distribution ou de répartition K . Ce paramètre de pondération des processus d'adsorption est nul pour les éléments dits conservatifs qui ne montrent aucun signe d'adsorption comme l'ion chlore Cl^- . Une forte valeur du paramètre $\rho_s \times K$ traduit une forte interaction entre le contaminant et le sol. Rowe (1988) a noté que ce produit variait de 0,18 pour le sodium à 7 dans le cas du potassium pour les barrières argileuses. Dans notre cas, vue la forte alcalinité des poussières et le souhait d'assurer le maximum de sécurité vis-à-vis de la migration des contaminants, nous avons choisi un coefficient de distribution $K=0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Les résultats de l'étude expérimentale sur modèle réduits et par simulation montrent que les ions chlorures présentent un coefficient de dispersion dans un intervalle de $6,5 \times 10^{-6}$ à $8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, semblable à celui qu'ils ont dans les barrières en argile. Ce coefficient prouve ainsi que le transport au sein des barrières développées s'est réalisé essentiellement par diffusion. L'épaisseur optimale de 1 m s'est avérée nécessaire lors des simulations pour éviter que la barrière perde son rôle d'écran atténuateur.

4.7 Gonflement et comportement thermique des mélanges

4.7.1 Introduction

Au laboratoire, une fois compactés, les échantillons ont tendance à gonfler et à fissurer. En chantier, On a observé des surfaces de gonflement de faibles à grandes ampleurs. Le gonflement peut apparaître instantanément ou à un âge retardé. L'hypothèse émise est que certains facteurs interactifs sont à l'origine de l'expansion: les gradients thermiques; les phases hydratées: portlandite, ettringite, syngénite; gypse; le tassement différentiel dû à la fondation ou les différences des densités de mise en place. L'étude du gonflement et le suivi des températures à différentes échelles se sont avérées nécessaires.

4.7.2 Comportement thermique des mélanges

Le mélange K5+10%CV+2%C soumis à 12 cycles de gel-dégel subit une perte en poids d'environ 11%. L'Association de ciment Portland (PCA) recommande une perte en poids maximale des sols de 14%. Par contre, le mélange K5+10%CV subit une perte en poids moyenne de 27%. Les mélanges à base de Brookfield ou d'Alpena s'effritent complètement à 12 cycles de gel-dégel (Annexe 5). La variation de la température lors du malaxage pour différents rapports eau/Exshaw5 et eau/(Exshaw5+10%CV Exshaw) en fonction du temps de malaxage est donnée par les figures 4.43 et 4.44.

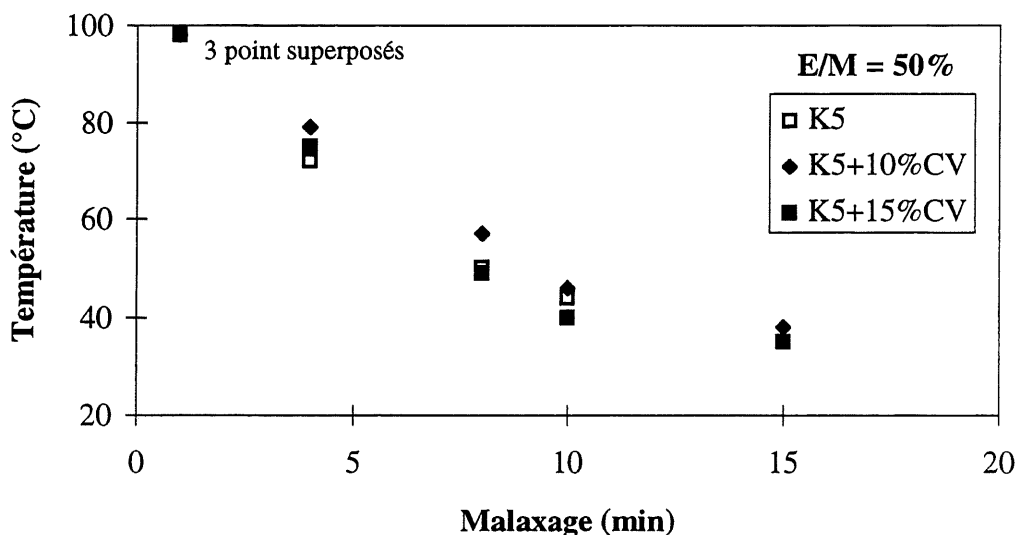


Figure 4.43 Évolution de la température en fonction du temps de malaxage et du pourcentage de cendres volantes pour un rapport eau/matériau de 0,5

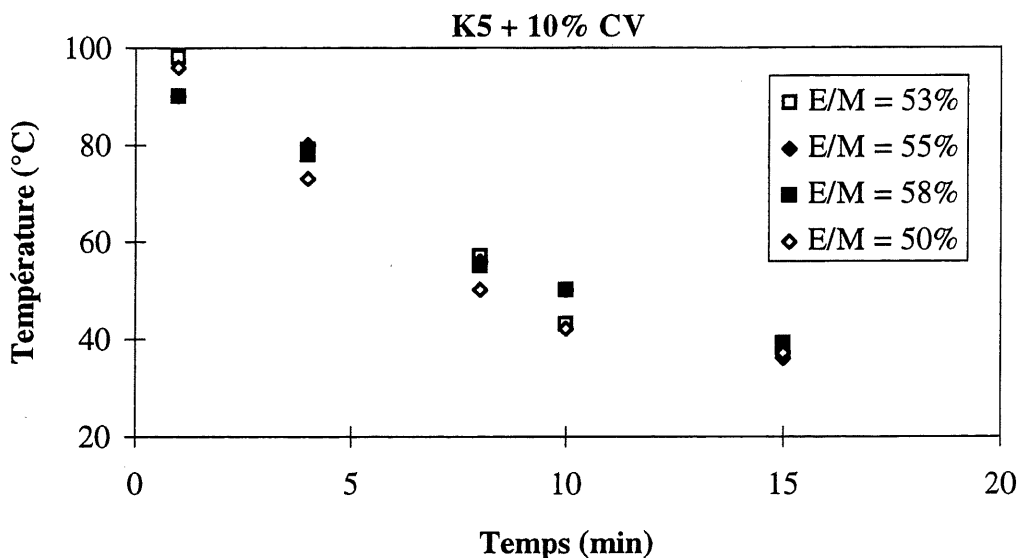


Figure 4.44 Évolution de la température lors du malaxage en fonction du temps et du pourcentage d'eau dans le mélange

Pour 15 minutes de malaxage, une perte de température d'environ 60°C peut être observée. Ainsi, en contrôlant la durée de malaxage, le gradient de température entre le coeur de l'ouvrage et le milieu environnant peut être réduit. Ce mode de procédure permet de diminuer les contraintes thermiques qui contribuent fortement à la fissuration. Les bancs d'essai au laboratoire et in situ sont élaborés pour étudier, entre autres, ces phénomènes thermiques.

L'augmentation de la température entraîne une perte en eau dans le mélange, soit par évaporation, soit par recombinaison lors des réactions d'hydratation. La figure 4.45 montre une relation linéaire entre le rapport eau-poussière initial (E/M) et la teneur en eau (W) après malaxage.

La figure 4.46 illustre bien le fait que le dégagement de chaleur est bien lié à la quantité de chaux présente dans la poussière.

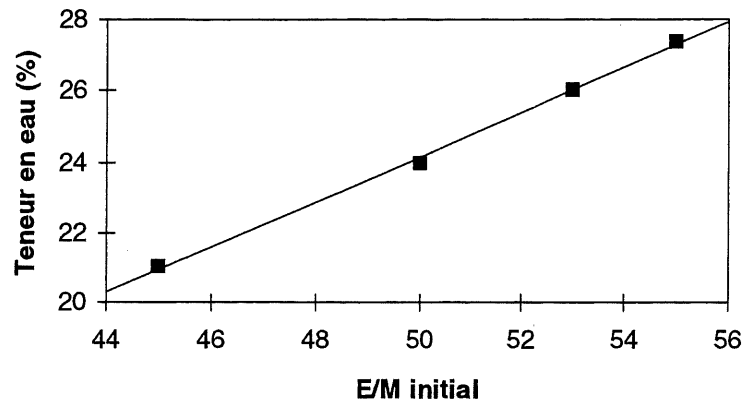


Figure 4.45 Teneur en eau en fonction du rapport eau/matériau initial

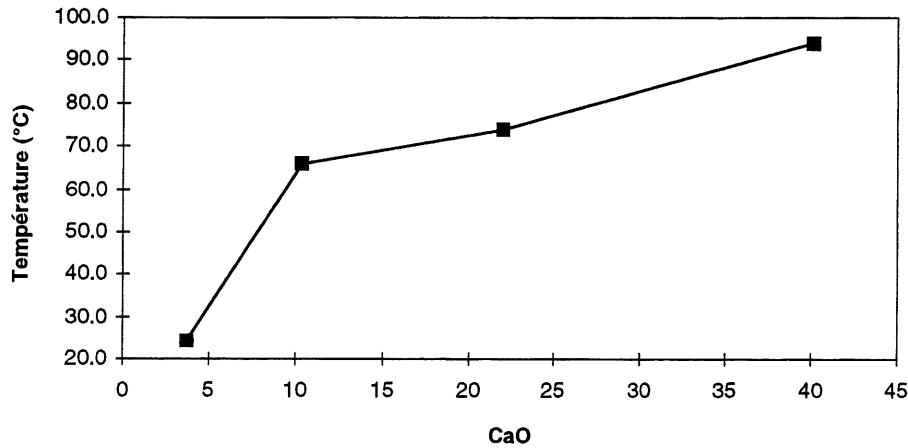


Figure 4.46 Température en fonction de la chaux libre

Des planches d'essai de 50 cm x 50 cm x 50 cm à base de poussières ont été réalisés au laboratoire (Figure 4.47). Quand le compactage est réalisé immédiatement après le malaxage, un soulèvement de la dernière couche est relevé 3 heures après la mise en place. Un temps d'attente de 30 minutes entre le malaxage et le compactage atténue d'une façon notable le gonflement des couches. L'observation a montré des températures élevées se situant entre 80 à 100°C. Cet effet thermique aura forcément des conséquences sur les vitesses des réactions d'hydratation qui, contribuent à leur tour à augmenter le dégagement de vapeur d'eau.

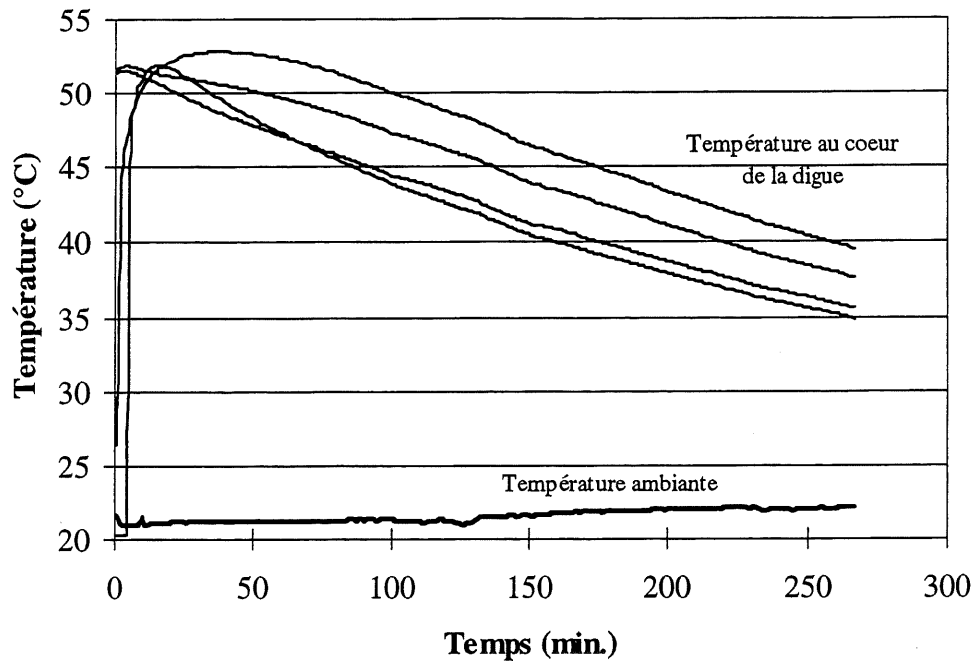


Figure 4.47 Évolution des températures de la planche d'essai en laboratoire (Exshaw5)

4.7.3 Gonflement à l'eau des mélanges

L'ensemble constitué du moule CBR et du comparateur a été adopté pour le suivi du gonflement de certains systèmes. Comme on l'a déjà mentionné au programme expérimental, le dispositif est plongé dans un bac contenant de l'eau qui diffuse par capillarité.

L'analyse des courbes reportées sur les figures 4.48 à 4.50 montre un gonflement très rapide dans les tous premiers instants du processus. Cependant une expansion plus accentuée est relevée pour le mélange (Exshaw5+10%CV Exshaw) à cause de la combinaison des ions expansifs tel que les ions aluminates, calcium et sulfate. Contrairement au CKD Exshaw4, Exshaw5 manifeste une augmentation en gonflement progressive et régulière et n'atteint la stabilité qu'après 20 jours.

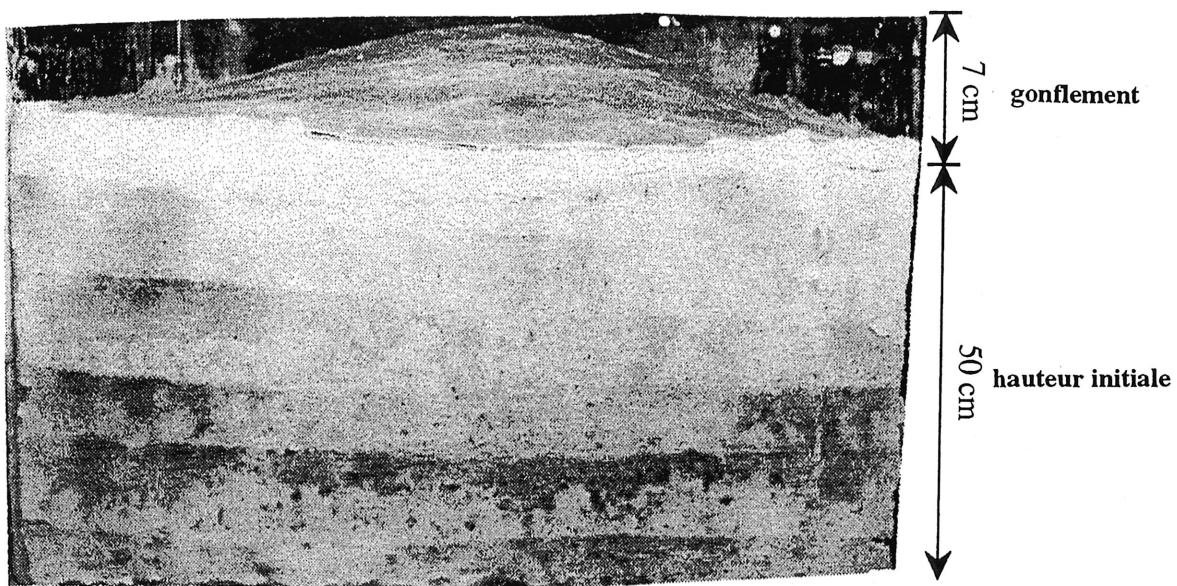


Figure 4.48 Phénomène de gonflement observé en laboratoire (Exshaw5)



Figure 4.49 Phénomène de gonflement observé sur chantier (Alpena)

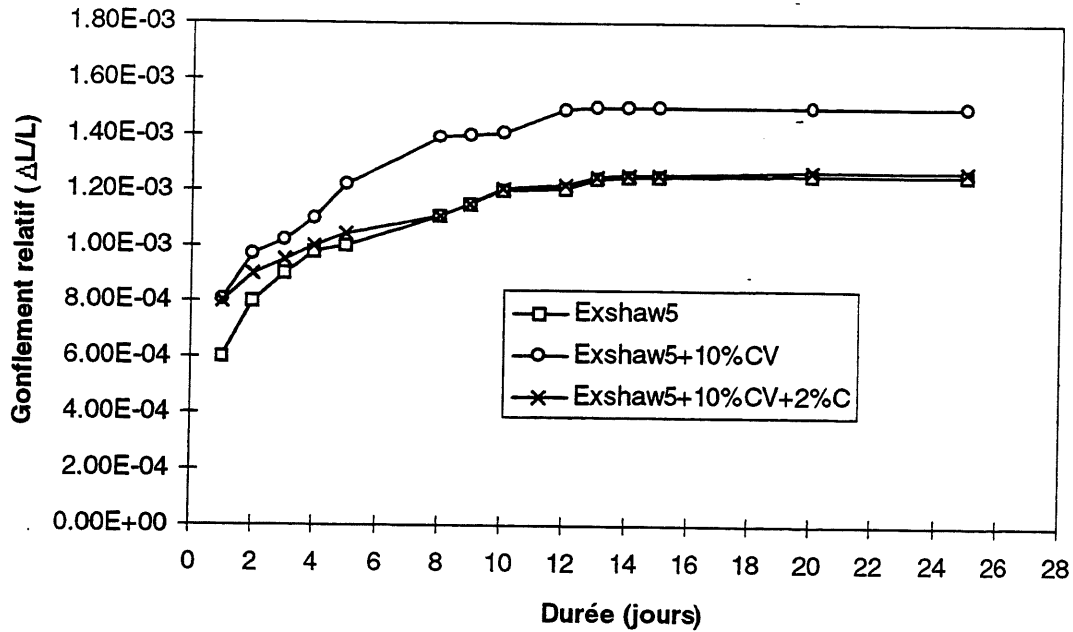


Figure 4.50 Évolution des gonflements à l'eau des différents mélanges à base d'Exshaw5

Cette particularité semble bien liée à la formation très importante de portlandite entraîne une augmentation importante du volume. Outre cette phase, l'ettringite et la syngénite contribuent de façon significative à ce phénomène.

Le point essentiel qui émerge de cette comparaison est que l'ajout de 2% en ciment type 10 permet de retrouver le gonflement initial des CKD Exshaw5 seul permettant, ainsi, d'annuler l'effet expansif généré par l'adjonction des cendres volantes.

Il est clair que ce comportement est le résultat de l'apport en silicates réactives soluble par le ciment qui en présence du calcium forme des CSH nécessaires à la cimentation.

L'analyse par diffraction des rayons X de cet échantillon montre un système polyphasique comportant de la portlandite, de l'ettringite, de la calcite et de la silice.

Une série de deux échantillons a été entreprise en utilisant des poussières d'Exshaw4 et Exshaw4+10%CV Saint-Clair.

L'analyse des courbes reportées sur la figure 4.51 montre que:

- les CKD seuls évoluent d'une manière régulière en augmentant pour atteindre un palier dès 2480 minutes. La valeur finale de $\Delta L/L$ relevée est située autour de 12×10^{-5} correspondant à un gonflement d'environ $5,9 \times 10^{-4}$ cm;
- l'ajout de 10% en cendres volantes entraîne une augmentation rapide de l'expansion. Celle-ci est très significative entre le début et après 450 minutes d'hydratation;
- ce comportement est identique à celui observé pour les échantillons renfermant 2% en boues rouges;
- après 15 heures de réaction, hormis Exshaw4 dopés par les cendres volantes, les autres systèmes montrent une certaine stabilité dans le temps. Les valeurs finales obtenues accusent une nette différence. Elles se situent autour de 12, 34, et 33 pour Exshaw4, Exshaw4+CV Saint-Clair, et Exshaw4+CV Saint-Clair+boues rouges respectivement;
- l'échantillon Exshaw4+10%CV Saint-Clair présente une stabilité après 125 heures de réaction.

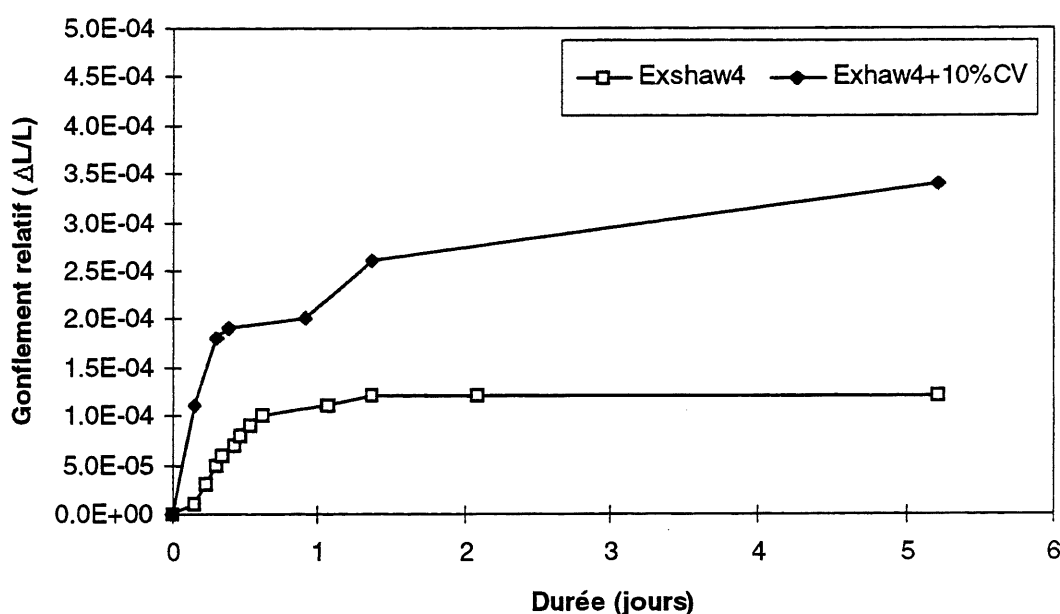


Figure 4.51 Évolution des gonflements à l'eau des différents mélanges à base d'Exshaw4

En comparaison avec la poussière d'Exshaw4 seule, le système dopé par 10% en cendres volantes entraîne une multiplication de l'expansion par 2,5. Cet accroissement peut être expliqué par la formation de l'ettringite expansive.

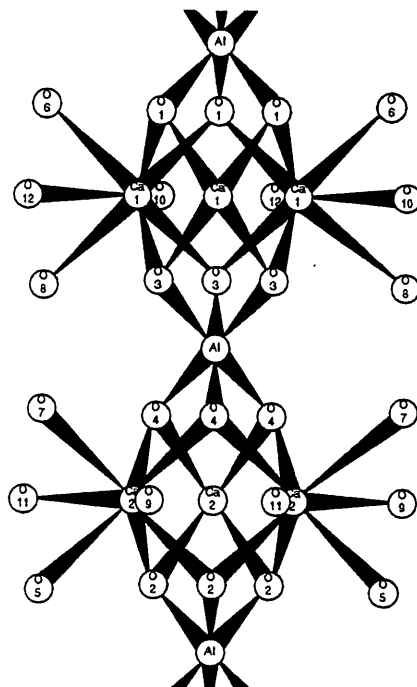


Figure 4.52 Structure de l'ettringite $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}, 26\text{H}_2\text{O}]$

4.7.4 Gonflement à l'air humide

En ce qui concerne le gonflement effectué sur des échantillons compactés et mûris en chambre humide, les variations de hauteur traduisant le potentiel expansif des CKD ont été mesurées à l'aide de comparateur jusqu'à stabilisation et les températures à l'aide de thermocouples placés au coeur des échantillons.

Différents temps d'attente entre le malaxage et le compactage et différents rapports eau/mélange initiaux avec ou sans ajouts minéraux ont été adoptés. L'évolution du gonflement avec le temps des différents échantillons est donnée aux figures suivantes.

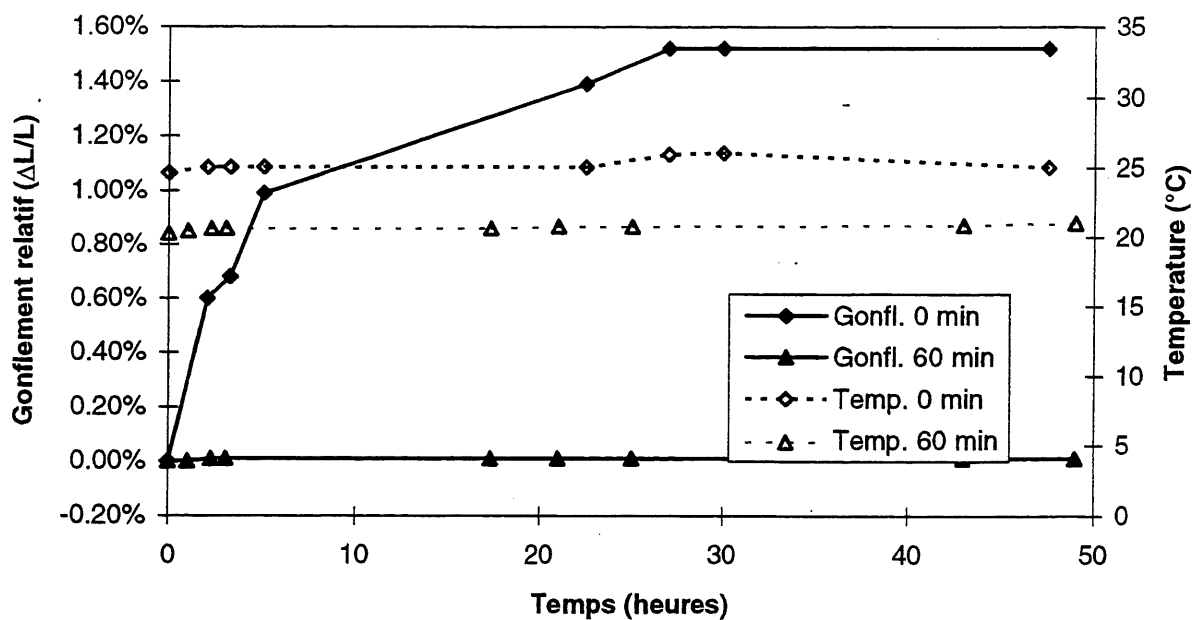


Figure 4.53 Évolution du gonflement et de la température: Brookfield

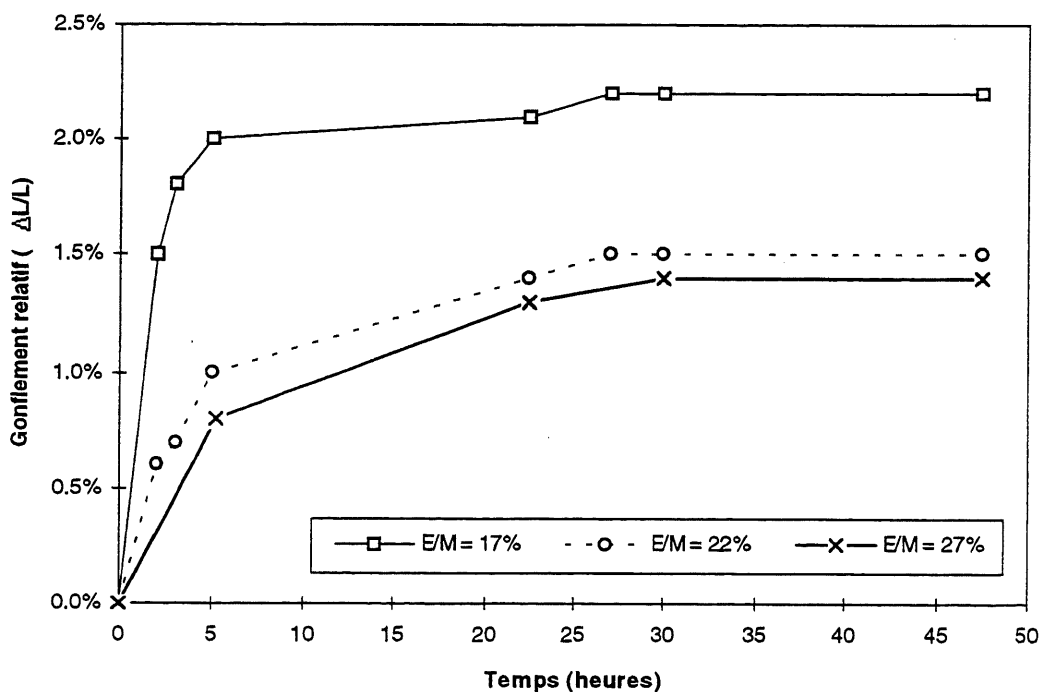


Figure 4.54 Évolution du gonflement - teneur en eau E/M: Brookfield

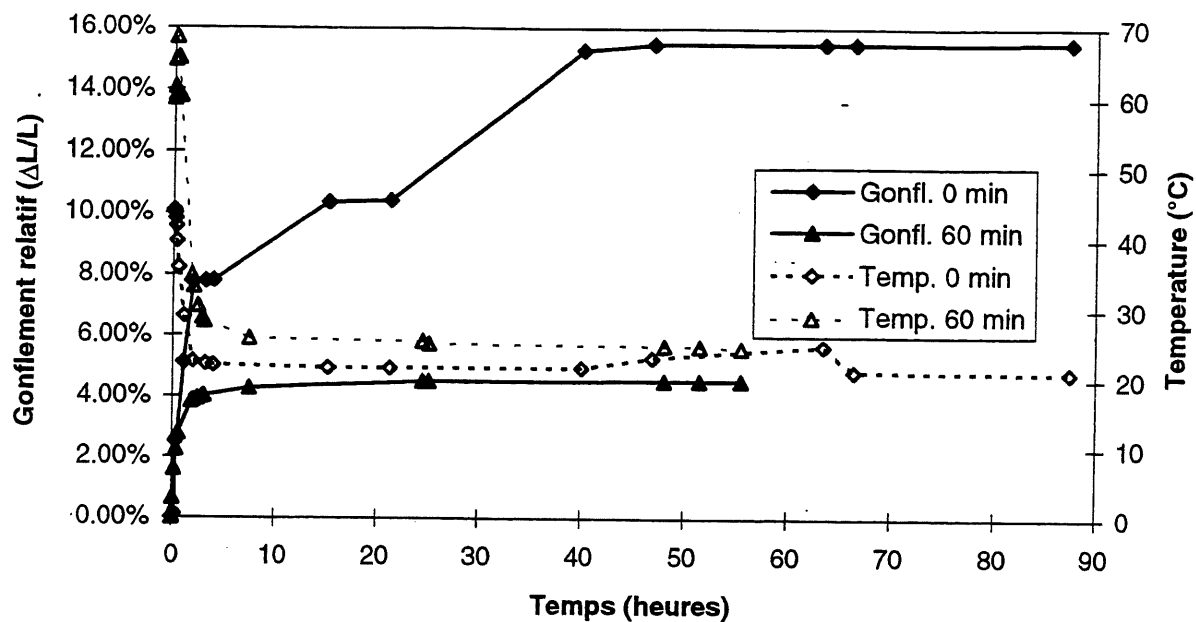


Figure 4.55 Évolution du gonflement et de la température: Exshaw 5+10% CV

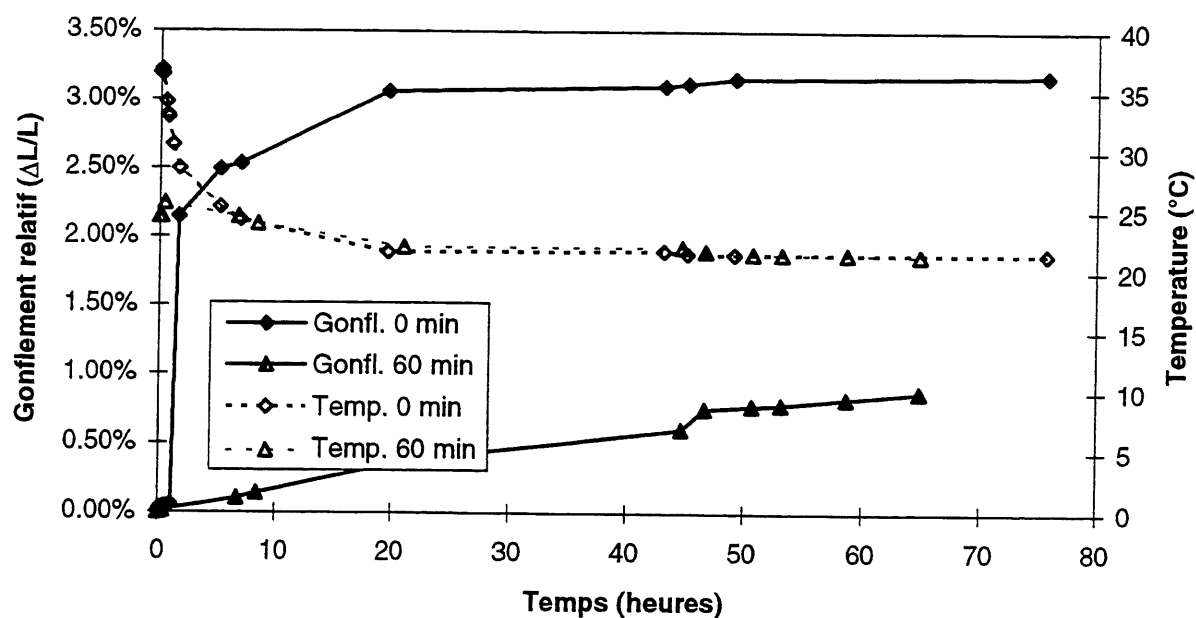


Figure 4.56 Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96)

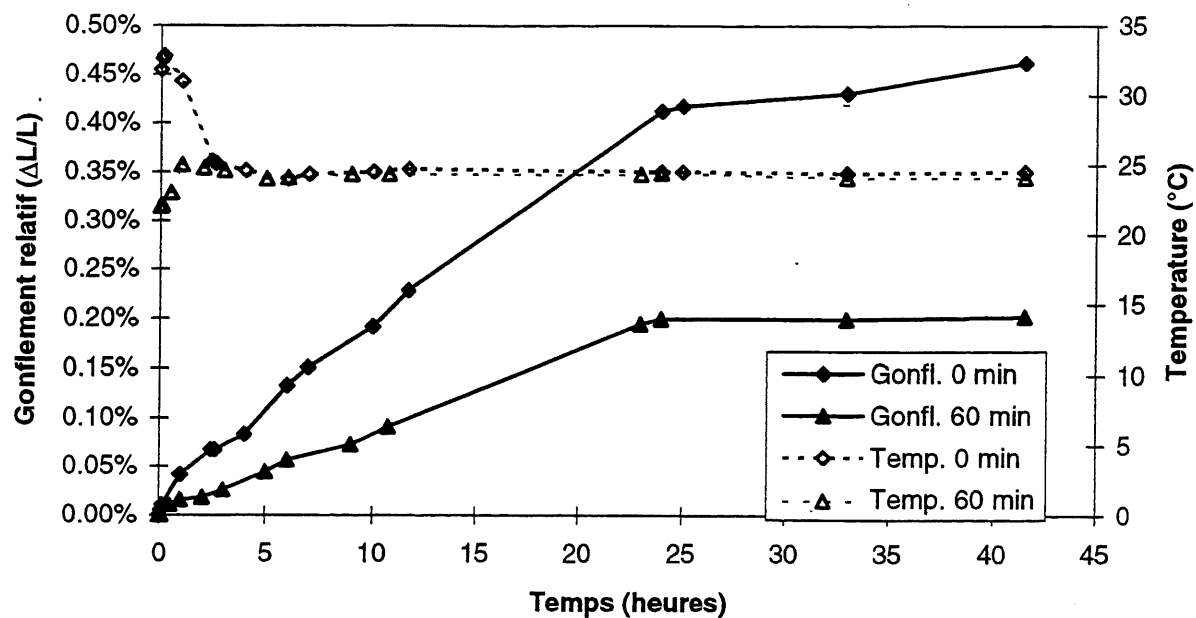


Figure 4.57 Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96)+10% Naticoke

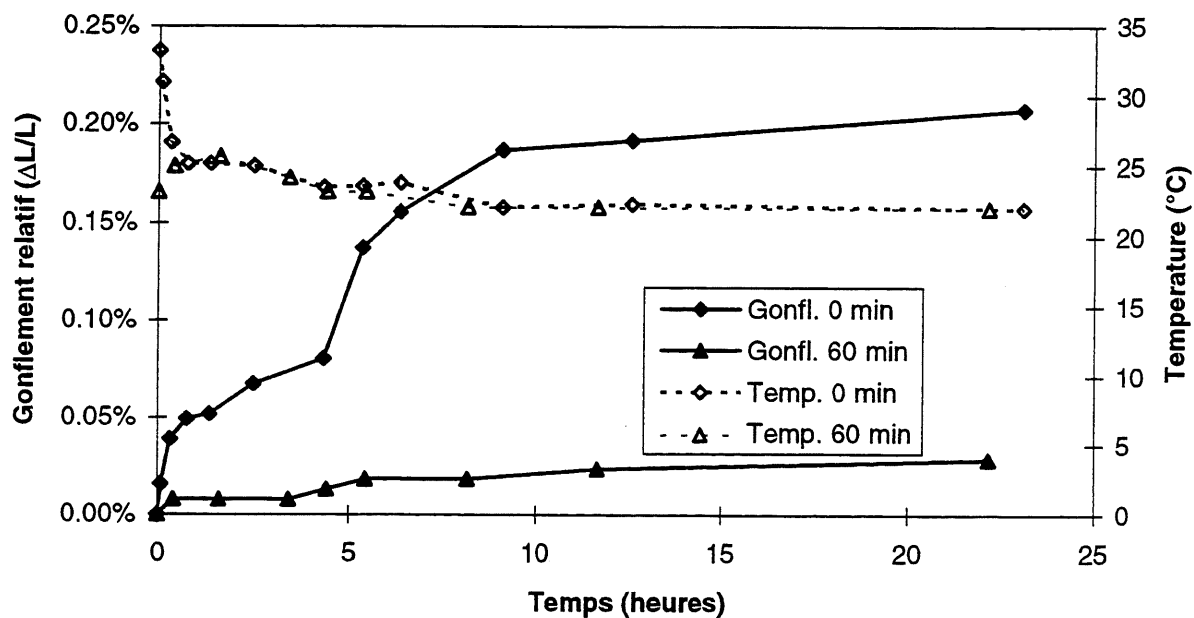


Figure 4.58 Évolution du gonflement et de la température: Alpena (31-10-96)+10% Edgewater

On peut observer que:

- tous les mélanges ont en général atteint leur maximum de gonflement en 48 heures;
- une attente de 30 à 60 minutes permet la consommation d'une partie de la chaux pour sa transformation en portlandite avant compactage, diminue l'effet de réactions d'hydratation initiales et contribue ainsi à diminuer le gonflement final;
- dans tous les cas, les valeurs du gonflement final sont inversement proportionnelles à la teneur en eau. La porosité de la matrice augmente quand la teneur en eau augmente, ce qui permet aux nouveaux hydrates de se former.
- plus le mélange est riche en chaux libre, plus le gonflement est important. Le volume molaire par cm^3 de la portlandite est de 33,1 contre 17,0 pour la chaux libre, les variations de volume étant inversement proportionnelles aux variations des masses volumiques.

Avec les ajouts minéraux, le temps de stabilisation passe de 48 heures à 5 heures pour les mélanges à base d'Exshaw5. Le gonflement final à l'air humide sans ajouts atteint 20% soit 5 fois le gonflement avec ajout. Cet effet de cendres volants sur le gonflement diminue quand la quantité d'eau augmente.

Les réactions d'hydratation se traduisent soit par une capacité à faire prise, soit par un gonflement entraînant la fissuration des mélanges. Le gonflement à l'air humide est fortement conditionné par la teneur en chaux des poussières et par la teneur en eau. La compétition entre le temps de prise et le gonflement est un facteur à considérer lors de la mise en place.

4.7.5 Élaboration du modèle pour le gonflement

De nombreux paramètres liés aux matières premières, y compris les conditions opératoires, sont susceptibles d'influer sur le gonflement et la fissuration. Un plan d'expérience a été établi en faisant varier trois paramètres de formulation. Il s'agit de la teneur en eau, de la chaux libre et des sulfates (SO_3). Malgré qu'il y ait une part de responsabilité sur le phénomène d'expansion, on s'est limité juste aux paramètres cités ci-dessus. L'alumine se distingue par un domaine intermédiaire défini par les limites 2,3 et 4,2%.

En général, l'expérimentateur choisira les facteurs de l'étude en fonction de la connaissance qu'il a du phénomène, de son intuition; leur importance conditionnera le nombre des expériences à réaliser, il dépendra donc des contraintes économiques et du temps [SADO, 1991]. Pour étudier trois facteurs, à raison de deux niveaux pour chaque facteur, 8 essais sont nécessaires pour mener à bien l'investigation. Les conditions de chaque essai sont décrites dans le tableau 4.32, appelé "matrice des essais" ou matrice d'expérience.

Comme, pour les systèmes considérés, la teneur en eau initiale varie entre 20 et 45%, la chaux libre entre 3 et 40% et les sulfates entre 4 et 11%, il apparaît logique, dans ce cas, d'attribuer les niveaux du tableau 4.32 à ces facteurs. À la suite des essais, huit informations disponibles qui, par le biais de la matrice des effets, seront transformées en huit informations directement exploitables:

- les effets de chacun des trois facteurs: E/M, f CaO et SO₃;
- les trois interactions: E/M-f CaO, f CaO-SO₃ et E/M-SO₃;
- l'interaction 3 à 3: E/M- f CaO-SO₃;
- la moyenne.

Le plan réalisé permet d'estimer, non seulement, les effets des principaux facteurs, mais également toutes les interactions possibles entre eux. Généralement, les interactions d'ordre 2 et au-delà sont bien souvent négligeables.

TABLEAU 4.32 MATRICE DES ESSAIS

Essai	Teneur en eau E/M (%)	Chaux libre f CaO (%)	Sulfates SO ₃ (%)
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	0	-1	-1
6	0	-1	+1
7	0	+1	-1
8	0	+1	+1
9	-1	0	-1
10	+1	0	-1
11	-1	0	+1
12	+1	0	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
Niveau -1	20	3	4
Niveau +1	45	40	11

Cependant, la matrice des effets (Tableau 4.33) s'obtient en effectuant le produit des colonnes pour les facteurs concernés.

TABLEAU 4.33 MATRICE DES EFFETS

Essai	E/M (%)	f CaO (%)	SO ₃ (%)	E/M-f CaO	f CaO-SO ₃	E/M-SO ₃	E/M-f CaO-SO ₃	Moyenne	Gonflement t=48h (%)
1	-1	-1	0	+1	0	0	0	+1	2,00
2	-1	+1	0	-1	0	0	0	+1	18,00
3	+1	-1	0	-1	0	0	0	+1	1,00
4	+1	+1	0	+1	0	0	0	+1	12,00
5	0	-1	-1	0	+1	0	0	+1	1,10
6	0	-1	+1	0	-1	0	0	+1	1,40
7	0	+1	-1	0	-1	0	0	+1	14,00
8	0	+1	+1	0	+1	0	0	+1	15,00
9	-1	0	-1	0	0	+1	0	+1	10,00
10	+1	0	-1	0	0	-1	0	+1	6,00
11	-1	0	+1	0	0	-1	0	+1	11,00
12	+1	0	+1	0	0	+1	0	+1	7,50
13	0	0	0	0	0	0	0	+1	7,90
14	0	0	0	0	0	0	0	+1	8,06
15	0	0	0	0	0	0	0	+1	8,10

Niv.-1	20	3	4
Niv. +1	45	40	11

Les 15 mélanges, exprimés en valeurs codées, considérées sur le plan expérimental sont listés dans le tableau 4.33. Ces valeurs codées sont calculées comme suit:

$$E/M_{\text{codée}} = (E/M_{\text{absolue}} - 32,5) / 12,5 \quad (4-8)$$

$$f \text{ CaO}_{\text{codée}} = (f \text{ CaO}_{\text{absolue}} - 21,5) / 18,5 \quad (4-9)$$

$$SO_{3\text{codée}} = (SO_{3\text{absolue}} - 7,5) / 3,5 \quad (4-10)$$

Les paramètres estimés du modèle statistique sont résumés dans le tableau 4.34. Le coefficient de corrélation (R^2) est de l'ordre de 0,99.

TABLEAU 4.34 PARAMÈTRES ESTIMÉS DU MODÈLE STATISTIQUE

Paramètre	Estimation	Erreur standard	Rapport t	Prob > t
Constante	8,0908	0,1199	67,45	0,0000
SO ₃	0,4750	0,0883	5,38	0,0007
f CaO	6,6875	0,0883	75,76	0,0000
E/M	-1,8125	0,0883	-20,53	0,0000
f CaO × f CaO	-0,2688	0,1296	-2,08	0,0717
E/M × f CaO	-1,2500	0,1248	-10,01	0,0000
E/M × E/M	0,4812	0,1296	3,71	0,0059

Une estimation négative signifie qu'une augmentation du paramètre réduit la valeur de la réponse désigné par le gonflement. En ce qui concerne les interactions du premier degré, il apparaît que les paramètres E/M, fCaO et SO₃ ont une influence significative sur l'expansion. À part E/M × fCaO, toutes les interactions du second ordre n'ont pas d'effet significatif sur le gonflement. La présence de paramètres en termes couplés indique que le modèle est quadratique. Comme on peut l'observer, le pourcentage de chaux libre est prépondérant dans le phénomène d'expansion.

L'équation proposée pour prédire le gonflement peut être exprimée par la relation:

$$Y = 8,09 + 6,69 (f \text{ CaO}_{\text{codée}}) - 1,81 (E/M_{\text{codée}}) + 0,48 (SO_{3\text{codée}}) - 1,25 (E/M_{\text{codée}}) (f \text{ CaO}_{\text{codée}}) + 0,48 (E/M_{\text{codée}})^2 - 0,27 (f \text{ CaO}_{\text{codée}})^2 \quad (4-11)$$

Le coefficient de corrélation pour ce modèle proposé est R²=0,99. Ce qui constitue une très bonne approche.

Pour estimer l'erreur expérimentale de ce modèle statistique, des essais ont été répétés au centre des points de la matrice des essais. Le tableau 4.35 montre la moyenne des réponses mesurées des répétitions pour les mélanges et le coefficient de variation. L'erreur expérimentale relative est limitée approximativement à 5%.

TABLEAU 4.35 RÉPÉTABILITÉ DES PARAMÈTRES TESTÉS AU CENTRE

Gonflement	Moyenne	Coefficient de variation
N = 3	8,02%	1,08%

La figure 4.59 montre que les valeurs estimées correspondent bien avec les valeurs mesurées dans l'intervalle de confiance de 95%. Cet ensemble de résultats relativement cohérent permet de militer en faveur de l'équation proposée afin de prévoir les phénomènes d'expansion générés par ces systèmes.

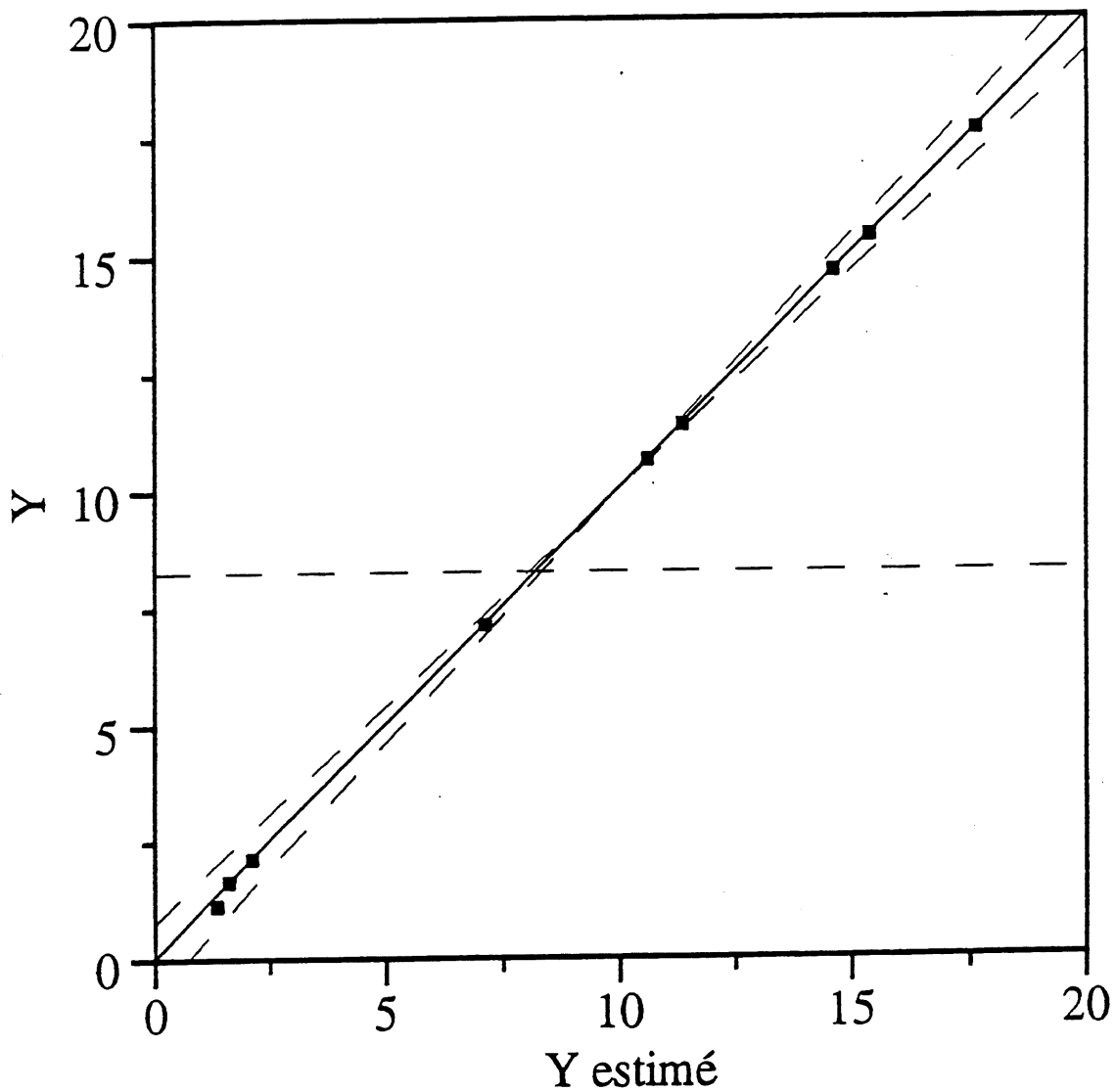


Figure 4.59 Correspondance entre le gonflement mesuré et le gonflement estimé

Les courbes des isovaleurs (Figure 4.60) montrent que les pourcentages en chaux libre et d'eau ont un effet significatif sur l'expansion. Quand le rapport E/M augmente, le gonflement diminue. Du point de vue pratique, ces isovaleurs sont des abaques pour avoir une estimation du gonflement avant toute mise en place.

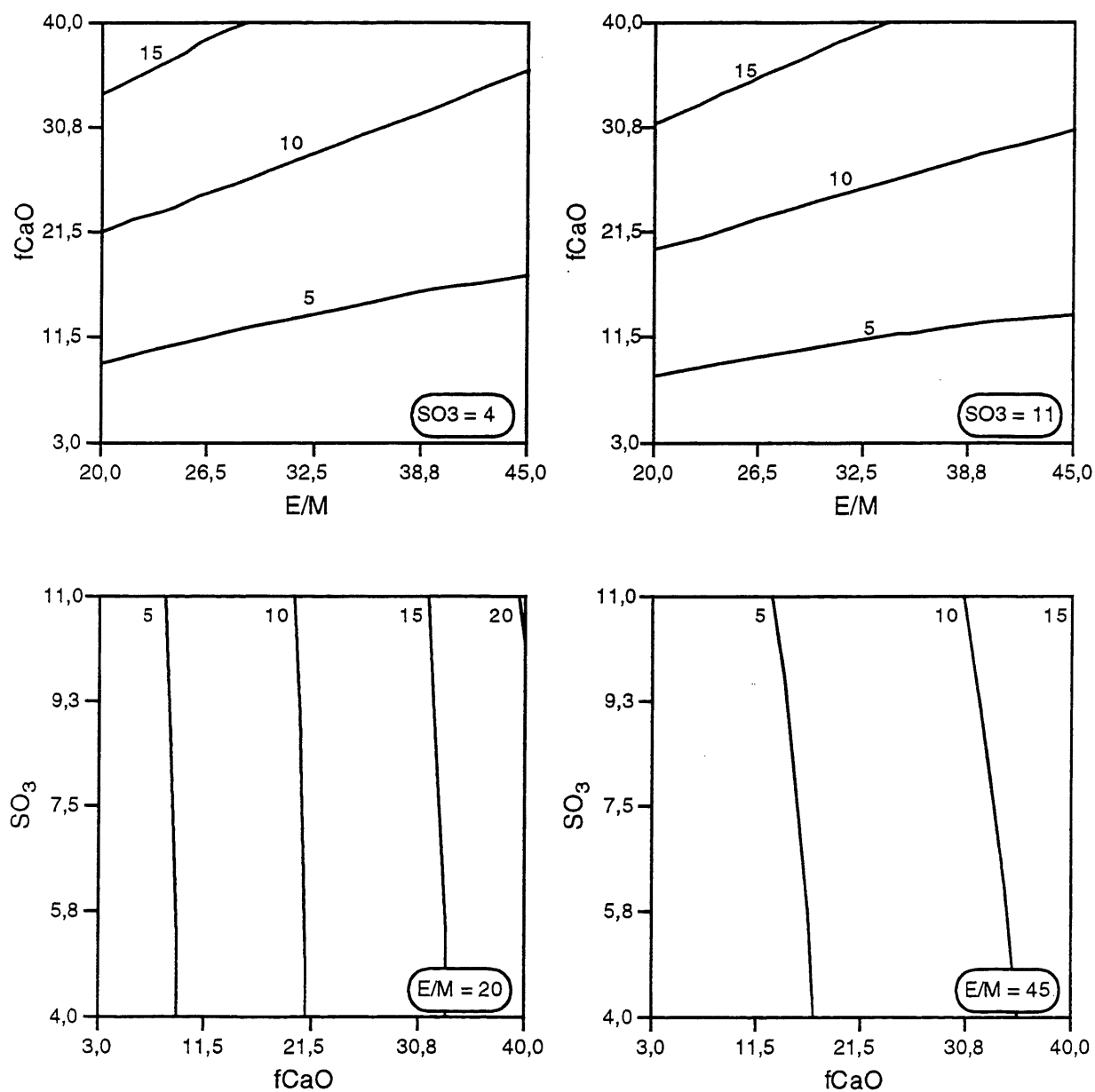


Figure 4.60 Estimation du gonflement à l'air humide ((5) = 5% de gonflement)

5 ESSAIS PILOTES EN CHANTIER

5.1 Introduction

Les résultats encourageants accumulés ont permis d'entreprendre la vérification des performances des mélanges élaborés en laboratoire à plus grande échelle, à l'aide de cellules de démonstration. Ce programme de réalisation permet d'une part, de simuler au mieux les différentes phases depuis le malaxage jusqu'au compactage, et d'autre part, de préciser l'aptitude des CKD comme "liners" dans les conditions exigées par Environnement Canada.

Deux cellules de démonstration, de dimension 6 m x 5 m et 1 m de hauteur ont été réalisées à l'Université de Sherbrooke en juillet 1995 avec les deux formulations: cellule 1 (Exshaw5+10%CV Exshaw) et cellule 2 (Exshaw5+10%CV+2%C type 10). Cinq cellules de démonstration ont été réalisées à la cimenterie d'Alpena de Lafarge au Michigan, É.-U., en novembre 1996 avec les formulations indiquées au tableau 5.6.

5.2 Planches d'essai Exshaw

5.2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

Les poussières de four utilisées sont issues du four 5 de l'usine Exshaw (K5). Les caractéristiques chimiques et physiques sont présentées au chapitre 4. Ces poussières et les cendres volantes d'Exshaw ont été livrées à l'Université de Sherbrooke les 16 et 19 juin 1995, dans des sacs imperméables d'une tonne chacun.

Afin de vérifier la reproductivité des essais vis-à-vis des résultats obtenus antérieurement sur les premiers lots ayant servi aux essais en laboratoire, les nouveaux lots ont été soumis à des tests préliminaires. Ces derniers ont permis d'aboutir à des résultats identiques.

En effet, des essais de compactage au laboratoire, avant le début du chantier, ont été réalisés avec ces matériaux. On a obtenu presque les mêmes résultats que ceux obtenus au laboratoire lors de l'optimisation des mélanges.

Le suivi de la minéralogie ainsi que la teneur en eau a montré une répartition homogène des systèmes considérés. Cependant les températures varient de 80 à 120 °C selon l'emplacement des thermomètres.

5.2.2 Caractéristiques géométriques et localisations des bancs d'essais

Les dimensions choisies pour chaque planche sont 6 m x 5 m x 1 m avec une pente 2/1. Un schéma détaillé de la planche d'essais est présenté à la figure 5.1. -

Le sol en place est constitué dans la partie supérieure d'une couche de remblai provenant de divers travaux d'excavation sur le campus et dont l'épaisseur est d'environ 30 cm. Ce remblai repose sur une zone d'environ 20 à 30 cm d'épaisseur de terre arable. Le sol naturel sur la terre arable est un till très compacté, constitué d'un mélange de sable et de silt avec peu de gravier.

5.2.3 Étapes de construction

a) Fondation

Après décapage de la couche de terre végétale, sur environ 60 cm, la surface a été nivelée pour préparer l'assise des cellules. Des drains agricoles, ont été installés à l'intérieur de tranchée, pour collecter les eaux percolants à travers les cellules. Tous les drains ont été connectés à un réservoir enterré dans le sol et qui fait office de regard de recueil des eaux. Une membrane en polyéthylène a été utilisée pour isoler les cellules de démonstration. Une couche de sable compactée a joué le rôle de couche de régularisation en facilitant le drainage des eaux de lixiviation.

b) Malaxage et épandage des matériaux

Au niveau du laboratoire, différents scénarios de malaxage ont été adoptés. Celui-ci a été entrepris avec une bétonnière mobile d'une capacité de 1,5 m³. Cet essai n'a pas été concluant en raison de la formation de grosses boules et l'empêchement des matériaux de s'écouler du malaxeur. Les essais ont montré que l'utilisation d'un malaxeur à mortier pour l'homogénéisation des mélanges est normalement conseillé pour de tels cas.

Le malaxage et l'homogénéisation des mélanges ont été effectués à l'aide d'un engin mécanique muni d'un rotoculteur. Selon l'expérience, cette méthode semble la plus appropriée. L'épandage des matériaux s'est fait sur une plate-forme à proximité du banc d'essai ce qui a permis d'assurer un malaxage homogène des différents constituants: eau, K5, CV et ciment.

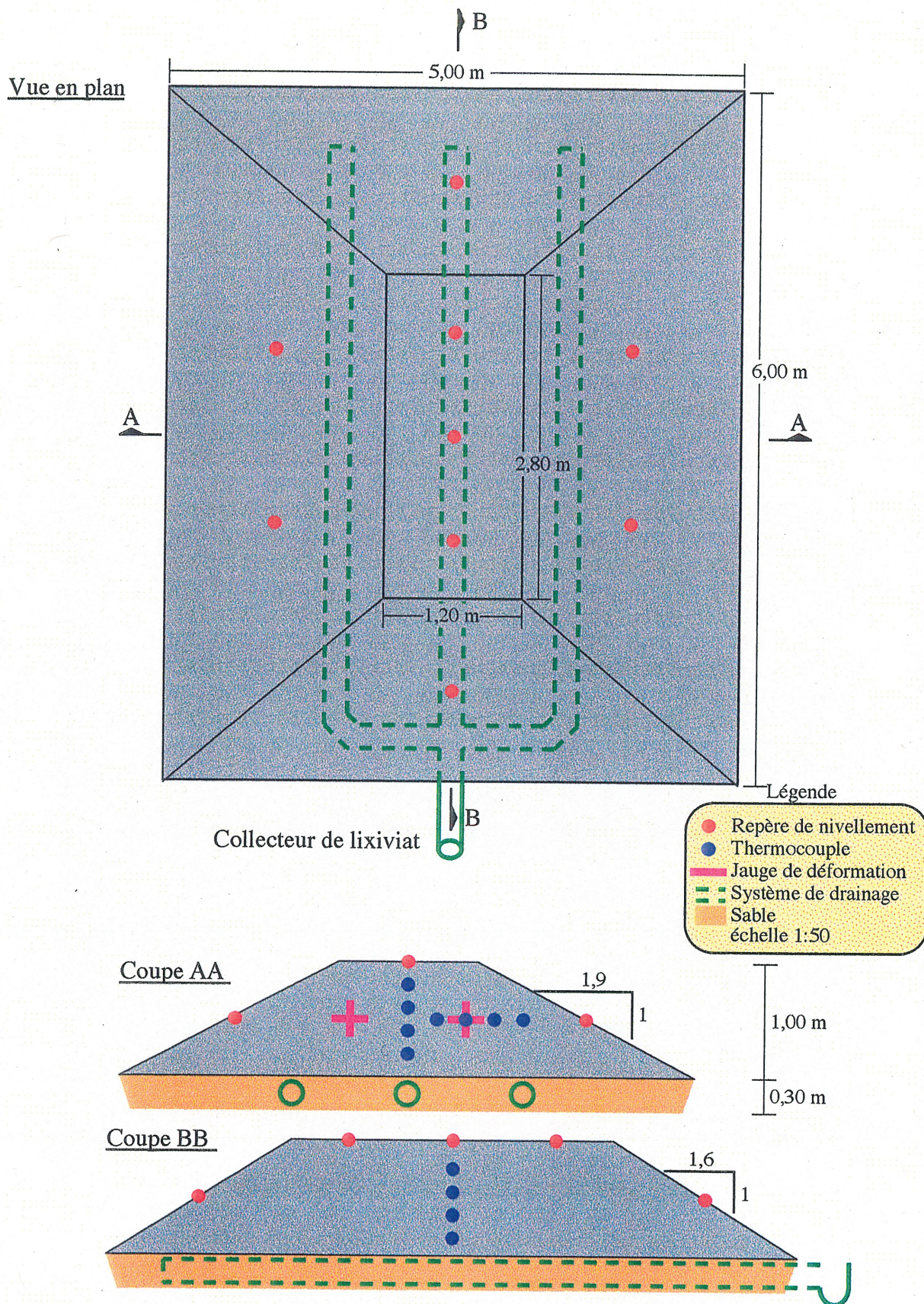


Figure 5.1 Caractéristiques géométriques des bancs d'essais

Une humidification préliminaire à l'aide d'un jet d'eau pour atténuer l'émanation des poussières dans l'atmosphère et réduire la température due à l'hydratation de la chaux libre s'est révélée indispensable. Les températures mesurées lors de cette première humidification varient de 100 à 180 °C. Une attente de 15 min avant le début du 1^{er} malaxage s'est avérée nécessaire. Le malaxage a été effectué après une attente d'une heure suivi par des prélèvements afin de vérifier la teneur en eau et l'homogénéité de l'humidification.

Lors de l'humidification, il a été constaté la formation d'une fine couche imperméable enveloppant la masse de CKD et empêchant l'eau de pénétrer. Au niveau du chantier, les teneurs en eau résiduelles variaient de 24% à 26%, ce qui correspond à un rapport eau/matériau de 50% à 55%.

c) Mise en place des couches

La mise en place des CKD Exshaw5 requiert des précautions à cause de l'augmentation de la température lors de leurs hydratations. Au début de la mise en place, les gradients de température entre le centre de la masse de l'ouvrage et les surfaces sont élevés. Après malaxage et suite à l'atténuation des effets thermiques, les températures finales mesurées sont de l'ordre de 50 °C.

Les matériaux sont répandus sur le site du banc d'essai à l'aide de la pelle mécanique en couche de 30 cm. La réalisation de l'ouvrage s'est effectuée en cinq couches. Le compactage est réalisé à l'aide d'un compacteur à roues pneumatiques. La densité en place est déterminée pour chaque couche à l'aide du cône de sable.

d) Contrôle de la qualité et instrumentation

Le programme expérimental décrit les essais et travaux de contrôle durant la mise en place et après la fin des travaux. La figure 5.2 présente la position des différents forages où les prélèvements d'échantillons ont été effectués.

- Suivi de la température

Reliés à un système d'acquisition, des thermocouples installés à différentes profondeurs ont permis le suivi de la température in situ après la mise en place des mélanges.

La température in situ (à 20 cm de profondeur) laisse apparaître des valeurs situées autour de 40°C au début de la mise en place des mélanges à base de poussières de four (Figure 5.3). Au fur et à mesure que la réaction avance, la température tend à diminuer pour atteindre des valeurs proches de l'ambiante, trois semaines après la mise en place. Au delà, la température de l'échantillon suit une évolution cyclique déterminée par la température ambiante. Les valeurs minimales sont relevées durant la saison hivernale et les valeurs maximales durant l'été. La variation de la température à 50 cm de profondeur en fonction du temps suit la même évolution observée à une profondeur de 20 cm dans la cellule de démonstration avec 2% en ciment. La différence réside dans le fait que la température relevée à cette profondeur durant la période hivernale est de -10°C à 50 cm contre -20°C à 20 cm (Figure 5.4).

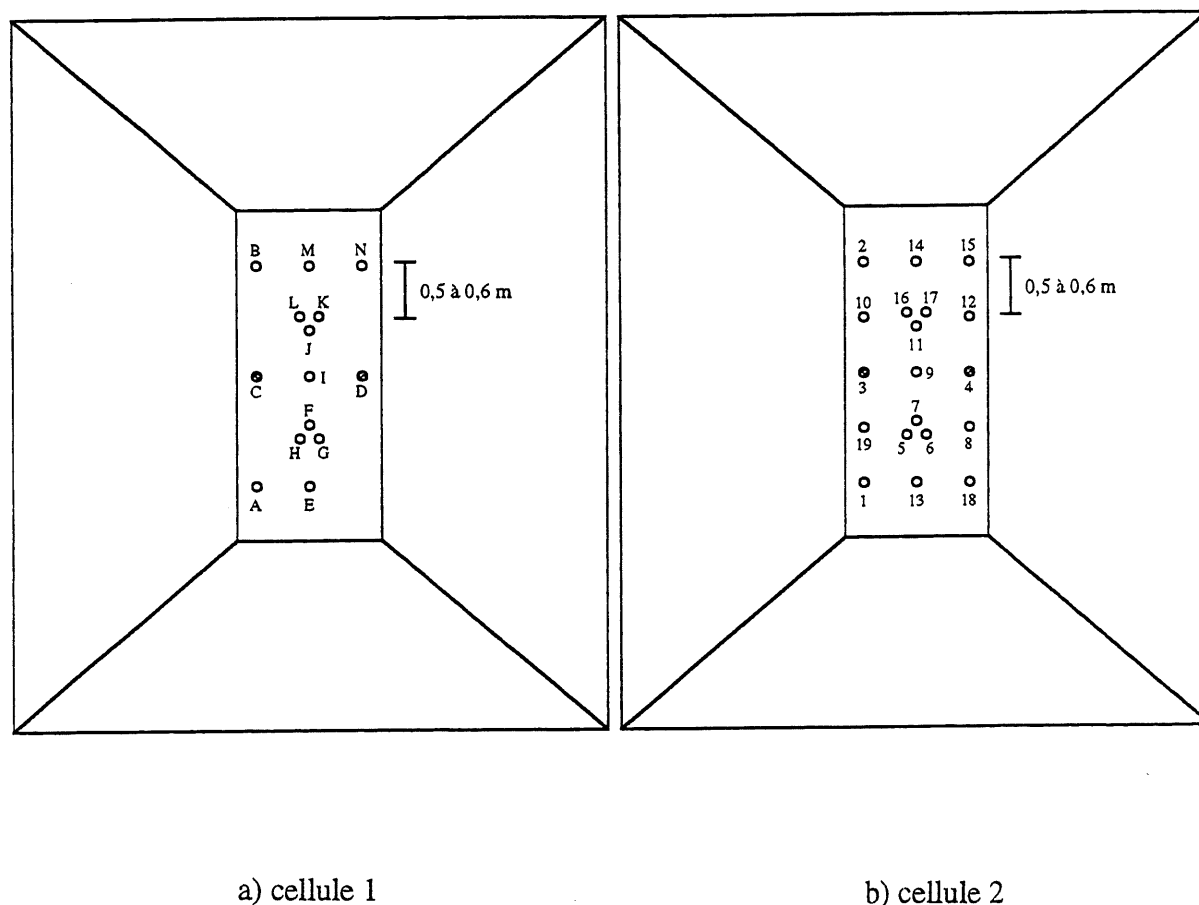


Figure 5.2 Localisation des prélèvements d'échantillon

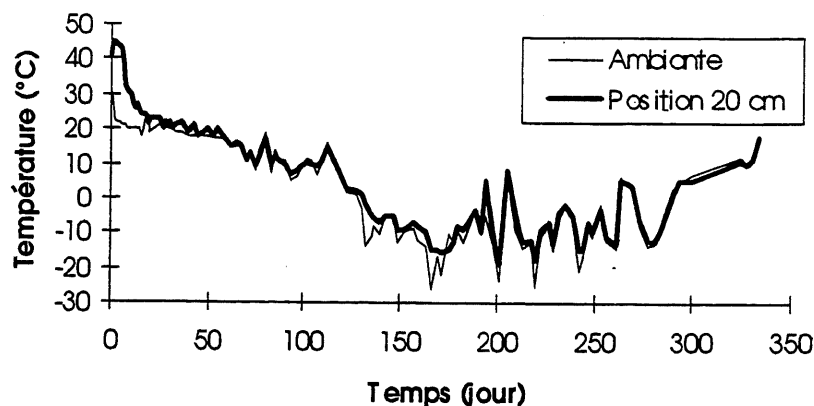


Figure 5.3 Évolution de la température à 20 cm dans la cellule 2 (CKD+10%CV+2%C)

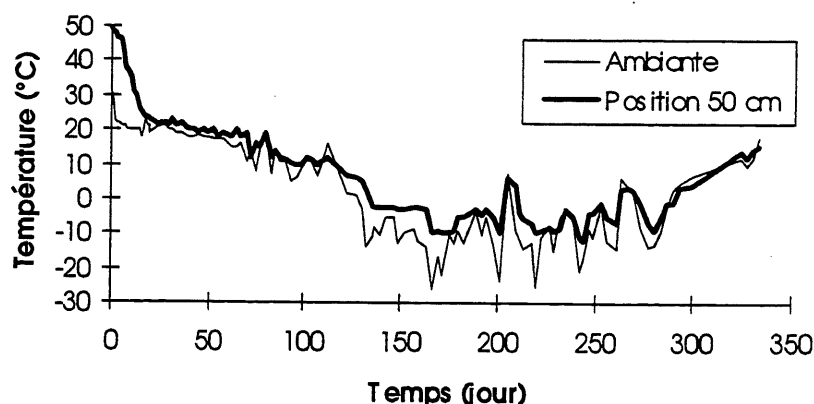


Figure 5.4 Évolution de la température à 50 cm dans la cellule 2 (CKD+10%CV+2%C)

Le suivi avec le reste des thermocouples durant la période hivernale a montré que le front de gel atteint une profondeur d'environ 60 cm. Cette observation peut permettre d'éviter les risques de détérioration pouvant être amenés par les cycles gel-dégel. En effet, la mise en place de terre végétale avec une hauteur de 60 cm peut limiter le front de gel en profondeur.

- Suivi de l'expansion

Le contrôle du gonflement généré par ces systèmes est difficile à suivre sur les bancs d'essai. Cette difficulté résulte probablement de la variabilité chimique, donc, du processus d'hydratation des phases cimentaires ou du fait que la majorité des réactions chimiques expansives ont déjà eu lieu lors du malaxage et de la mise en place. En plus de l'effet exothermique, le temps d'attente d'environ une heure s'avère efficace pour atténuer fortement les réactions d'expansion (Annexe 4).

- Mesure de la perméabilité in situ

Le suivi de ce paramètre a requis la réalisation de deux forages par cellules de démonstration (Figure 5.5). Le suivi du niveau de la colonne d'eau en fonction du temps a été facilité par l'utilisation d'une sonde électrique. Ces variations de niveau ont été prises au millimètre près pour conserver la même précision. Pratiquement, on a réduit le nombre de résultats douteux en contrôlant rigoureusement les opérations de forage et en limitant la colonne d'eau appliquée. Le suivi des repères de nivellement, avant et après mesures, a montré qu'il n'y a pas eu de changement volumique des planches d'essais. Les résultats obtenus en duplicata sont reportés dans le tableau 5.1.

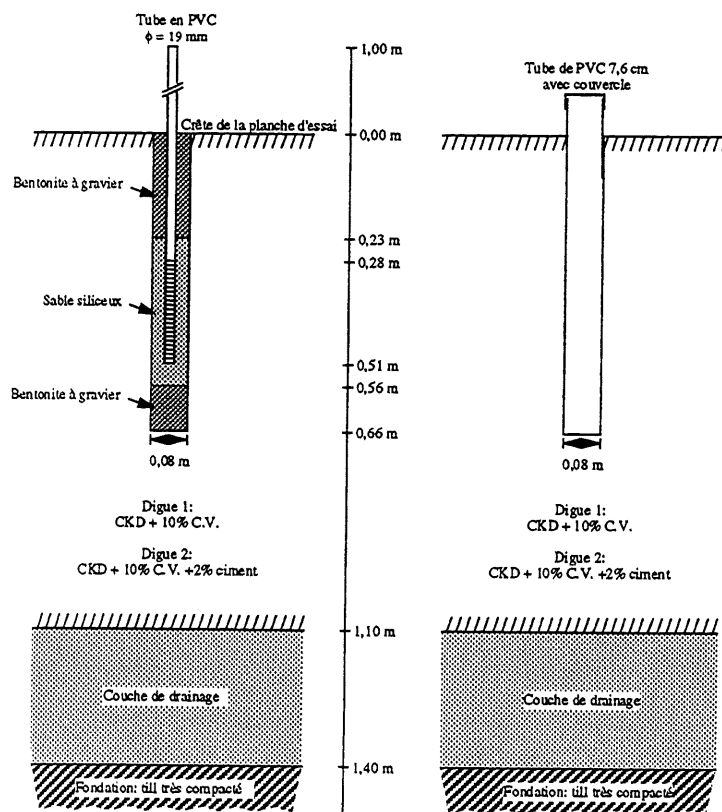


Figure 5.5 Forages pour la réalisation des essais de perméabilité, le suivi de la lixiviation et le prélèvement de carottes

TABEAU 5.1 RÉSULTATS DES MESURES DE PERMÉABILITÉ DANS LES CELLULES DE DÉMONSTRATION

Cellule	Perméabilité (cm/s)
K5+10%CV	$1,5 \times 10^{-6}$
	$2,0 \times 10^{-6}$
K5+10%CV+2%C	$4,0 \times 10^{-7}$
	$2,0 \times 10^{-7}$

Les carottes issues des prélèvements ont été soumises à des essais de perméabilité en laboratoire. Les résultats obtenus sur les deux cellules de démonstration sont reportés dans les tableaux 5.2 et 5.3. À titre d'indication, l'ensemble des résultats complémentaires est résumé en annexe 3.

TABEAU 5.2 RÉSULTATS DES PERMÉABILITÉS SUR LES CAROTTES RÉCUPÉRÉES À 30 cm DANS LES CELLULES

Échantillon	Teneur en eau (%)	Degré de saturation (%)	ρ humide (kg/m ³)	Perméabilité (cm/s)
C1 - 30 cm	31,87	81,72	1015,0	$5,0 \times 10^{-6}$
C1 - 30 cm	33,54	81,80	1020,0	$0,2 \times 10^{-7}$
C2 - 30 cm	32,35	78,33	1115,3	$3,0 \times 10^{-7}$
C2 - 30 cm	29,80	76,90	930,0	$0,2 \times 10^{-7}$

La moyenne de trois mesures

TABEAU 5.3 RÉSULTATS DES MESURES SUR LES CAROTTES DE LA CELLULE 2

Profondeur (cm)	Degré de saturation (%)	ρ humide (kg/m ³)	Perméabilité (cm/s)
10	89,84	1217	$2,0 \times 10^{-7}$
30	77,68	1040	$1,5 \times 10^{-7}$
50	83,76	1130	$4,0 \times 10^{-8}$
60	94,85	1122	$1,0 \times 10^{-8}$

La moyenne de trois mesures

D'une manière générale, les perméabilités obtenues in situ sont relativement plus élevées que celles déterminées en laboratoire. Cette différence résulte de la faible compaction opérée sur les cellules de démonstration par rapport aux éprouvettes élaborées en laboratoire.

Les résultats ont montré que le rapport $K_{\text{chantier}}/K_{\text{laboratoire}}$ est de l'ordre de 10 à 100. Il paraît nécessaire de considérer un coefficient de sécurité de 10 permettant ainsi de prendre en

compte les conditions de chantier par rapport à celles du laboratoire. Comme on peut le constater, la perméabilité est inversement proportionnelle à la profondeur.

- Analyse chimique des lixiviats

Du fait de l'imperméabilité des couvertures à base de poussières de four, de cendres volantes ou du ciment, il y a absence totale de lixiviats dans les puits de captage. Pour cette raison, l'eau utilisée comme agent perméant lors de la détermination de la perméabilité en laboratoire sur des carottes prélevées sur les cellules de démonstration a fait l'objet d'analyse chimique.

Les résultats reportés dans les tableaux 5.4 et 5.5 montrent que quelle que soit la cellule de démonstration considérée, les concentrations en plomb sont inférieures à 5-6 ppm. Ces valeurs sont inférieures aux normes de la directive 019 du MENVIQ (10 ppm) et de l'EPA (5 ppm).

TABLEAU 5.4 LESSIVAGE AU PERMÉAMÈTRE: ÉCHANTILLON 1

Jour	pH	Ca (mg/l)	Pb (mg/l)	T.D.S.
2	12,09	35	0,06	2900
4	12,09	61	0,05	3000
8	11,95	170	0,05	3000
10	11,00	300	0,06	3100
20	11,87	300	<0,05	3400
27	11,70	380	<0,05	4000
32	11,87	400	<0,05	3900
38	11,90	440	<0,05	4200
48	11,85	440	<0,05	4600

L'échantillon 1 provient de la cellule 1 (K5+10%CV).

T.D.S.: solides totaux dissouts (mg/l)

En ce qui concerne les teneurs cumulatives relatives au calcium, l'augmentation est continue et régulière pour atteindre un pseudo-palier après un mois de test de lessivage dans le perméamètre. Quant au pH, les valeurs mesurées sont inférieures à 12 après quelques jours de lixiviation. Ces résultats se confirment au niveau des échantillons avec une faible teneur en ciment. Les solides totaux, dans une certaine mesure, semblent suivre l'évolution du lessivage du calcium. En outre, l'adjonction de 2% en ciment engendre une réduction de la lixiviation du Ca^{2+} et des solides totaux dissouts. Cette amélioration se traduit par une meilleure consolidation assurée par l'apport en ciment.

TABLEAU 5.5 LESSIVAGE AU PERMÉAMÈTRE: ÉCHANTILLON 2

Jour	pH	Ca (mg/l)	Pb (mg/l)	T.D.S.
2	11,85	18	<0,05	980
4	11,90	32	<0,05	1100
8	11,75	110	<0,05	1020
10	11,64	220	<0,05	1000
20	11,59	240	<0,05	1100
27	11,55	230	<0,05	1150
32	11,50	228	<0,05	1100
38	11,50	230	<0,05	1090
48	11,40	226	<0,05	1080

L'échantillon 2 provient de la cellule 2 (K5+10%CV+2%C).

T.D.S.: solides totaux dissouts (mg/l)

5.3 Planches d'essais d'Alpena

5.3.1 Introduction

Cinq planches d'essai ont été réalisées à l'usine Alpena au Michigan, É.-U. Certaines sont des cellules témoins et d'autres construites pour tester certaines précautions à prendre lors de la mise en place des barrières de recouvrement. Les formulations des mélanges choisis et le processus de mise en place sont résumés au tableau 5.6. L'élaboration des bancs d'essai à base de poussières de four provenant de l'usine Exshaw en Alberta a servi de précurseur pour procéder à la mise en place d'autres cellules de démonstration sur ce site de la cimenterie d'Alpena en utilisant les CKD produites à l'usine.

TABLEAU 5.6 SPÉCIFICATIONS DES PLANCHES D'ESSAI D'ALPEN A

No	Composition	Compaction	Détails	Dimensions (m)
1	KG5 30% d'eau	Décapeuse élevatrice	---	4,88 x 28,65 x 0,51
2	KG5 et KG6 30% d'eau	Décapeuse élevatrice	30 min. avant la compaction	3,96 x 24,69 x 0,38
3	KG6 10% CV Edgewater 30% d'eau	Compacteur pneumatique	30 min. avant la compaction Eau entre les couches	4,88 x 24,99 x 0,51
4	KG5 10% CV Edgewater 30% d'eau	Compacteur pneumatique	30 min. avant la compaction Eau entre les couches	4,88 x 24,38 x 0,58
5	KG6 10% CV Nanticoke 39% d'eau	Compacteur pneumatique	30 min. avant la compaction Eau entre les couches	4,27 x 24,38 x 0,41

5.3.2 Investigations préliminaires

Avant le début du chantier, on a réalisé des essais Proctor à titre de comparaison avec ceux qui ont été faits au laboratoire lors de l'optimisation des mélanges. - Le tableau 5.7 contient les résultats de ces essais.

TABLEAU 5.7 TENEUR EN EAU - MASSE VOLUMIQUE, ALPENA

Composition	Rapport E/M initial (%)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Température du mélange (°C)
CKD	30	1457,5	39
CKD + 10% Edgewater	30	1454,3	35
CKD + 10% Nanticoke	30	1464,0	37

Tous les mélanges montrent que la teneur en eau optimale est de 30%. Ce pourcentage est celui obtenu lors des essais en laboratoire.

5.3.3 Étapes de construction

a) Stockage des matériaux

Pour le stockage des matériaux, 2 silos ont été utilisés. Le silos pour les cendres volantes a une capacité de 7,08 m³. Celui des CKD a une capacité de 28,3 m³ et demande une heure et demi pour le remplissage.

b) Malaxage

Le malaxeur est contrôlé par un ordinateur et les données peuvent être obtenues directement. Les quantités des matériaux secs sont pesées par tapis munis d'une balance et l'eau, par un débitmètre. La procédure de malaxage est comme suit: les poussières et les cendres volantes arrivent au malaxeur par deux côtés. La vitesse de malaxage est sélectionnée selon les cadences de mise en place et pour une dissipation adéquate de la chaleur. Le taux de fourniture des poussières et des cendres volantes est fixé et le taux de l'eau ajusté pour obtenir un pourcentage CKD-CV/eau de 30%. Les taux de fournitures sont vérifiés périodiquement.

Le seul moyen pour étudier les mélanges à la sortie du malaxeur était de toucher le mélange et l'observation visuelle. Des échantillons ont été régulièrement amenés au laboratoire dans des sachets hermétiques pour déterminer la teneur en eau. La priorité pour le début de

l'opération est que la procédure de malaxage soit stable pour fournir des mélanges homogènes de poussières, cendres volantes et eau. Pour acheminer les matériaux au malaxeur, un camion a été utilisé pour le transport des cendres volantes. Un tapis roulant permet le transport des matériaux du malaxeur vers la décapeuse pneumatique. Cette dernière effectue l'épandage en couches d'épaisseur de 15 à 30 cm.

5.3.4 Compactage

Les mélanges ont été aisément compactés avec des équipements standards disponibles commercialement. La décapeuse pneumatique a servi pour la compaction pour les deux premières cellules tandis que le compacteur pneumatique pour les trois autres cellules. Le nombre de passes nécessaire pour obtenir la masse volumique sèche optimum de l'essai Proctor normal a été déterminé: sept passes pour la décapeuse ou neuf pour le compacteur pneumatique. Le pénétromètre de poche a été utilisé pour vérifier la résistance après les différentes passes. Les épaisseurs et températures des différentes couches avant et après compactage ont été mesurées.

Lors de la mise en place, l'installation de 3 thermocouples par couche a permis le suivi de la température. La température ambiante relevée est de 8 à 10 °C.

5.3.5 Cellule 1: KG5

La température des matériaux à l'épandage est de 35 °C. Le compactage par la décapeuse est immédiatement réalisé sans attente (Tableau 5.8). Après une demi-heure, nous avons observé un flux de vapeur intense venant de la surface des couches. Quand la température a atteint une valeur autour de 100 °C, on a constaté des fissures et des soulèvements de la dernière couche surtout.

Ces fissures se présentent sous forme d'ouvertures parallèles et perpendiculaires à la longueur de la planche. Leurs épaisseurs varient de 16 à 20 cm (Figure 5.6).

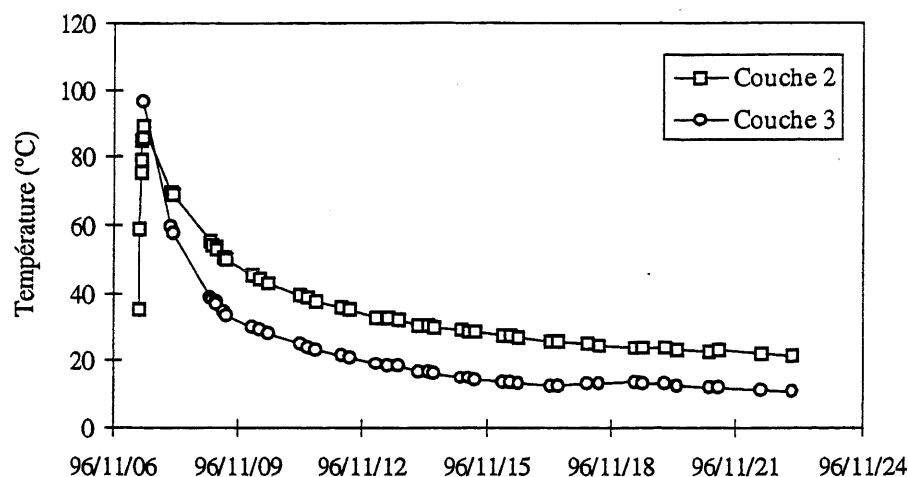


Figure 5.6 Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 1

TABLEAU 5.8 PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE MISE EN PLACE - BANC D'ESSAI 1

Couche	Nucléodensimètre			Tube Shelby			Température (°C)	Pénétromètre (kg/cm ²)
	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)		
2A	1488,0	11,1	1338,7	1608,4	21,5	1324,3	38	2,15
2B	1542,6	12,6	1382,1	1411,0	22,0	1157,4	42	2,15
3A	1518,5	11,1	1366,0	1338,7	22,8	1089,9	36	3,23
3B	1465,6	13,5	1292,2	1494,5	24,8	1197,5	40	3,23
4A	1422,2	14,0	1247,2	1764,1	27,9	1378,9	38	> 4,84
4B	1643,7	19,0	1380,5	1303,4	21,5	1072,3	36	> 4,84

On a réalisé des tranchées d'inspection:

- pas de contact entre les couches compactées;
- pas de fissures visuelles en profondeur;
- un cisaillement entre les couches compactées

À 28 jours suivant la mise en place, des prélèvements d'échantillon ont été réalisés. Ce qui a permis d'aboutir aux résultats des essais mécaniques (ASTM C39), hydrauliques (ASTM D5084) et de lessivage (TCLP). L'ensemble est illustré par le tableau 5.9.

TABLEAU 5.9 RÉSULTATS MÉCANIQUES, HYDRAULIQUES ET DE LESSIVAGE - BANC D'ESSAI 1

Paramètre	Critère	A	B	C	D
CO (MPa)	1	5,2	3,2	5,0	3,1
K (cm/s)	10^{-7}	$1,3 \times 10^{-5}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$
Alcalinité (mg/l)	---	480	110	310	220
Fluor (mg/l)	2,1	1,2	0,9	1,0	0,9
T.D.S. (mg/l)	---	3 400	2 200	2 600	2 400
Sulfates (mg/l)	---	960	870	900	920
Calcium (mg/l)	---	390	180	360	300
Chrome ($\mu\text{g/l}$)	120	< 3	< 3	< 3	< 3
Plomb ($\mu\text{g/l}$)	4	< 1	1	1	1
Magnésium ($\mu\text{g/l}$)	---	< 100	< 100	< 100	< 100
Mercure ($\mu\text{g/l}$)	2,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Potassium ($\mu\text{g/l}$)	---	770 000	630 000	490 000	540 000
Sélénium ($\mu\text{g/l}$)	35	14	< 5	< 5	< 5
Sodium ($\mu\text{g/l}$)	150 000	120 000	83 000	77 000	75 000

5.3.6 Cellule 2: KG5 et KG6

Après une attente d'environ 30 minutes entre l'épandage et le compactage, la température se situait autour de 40 °C. La chaux après hydratation en fournissant la protlandite est exploitée avant toute mise en place. Cette procédure a permis de diminuer l'intensité des réactions d'hydratation. En effet, les fissures observées quand la température a atteint 90 °C après 3 heures de mise en place, ont atteint une épaisseur de 1 à 3 cm pour les plus grandes et 1 à 3 mm pour les plus faibles. Le gonflement est de l'ordre de 10 cm. Il est moins important que celui observé sur la cellule 1. La surface supérieure est meilleure que celle de la première cellule.

TABLEAU 5.10 PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE MISE EN PLACE - BANC D'ESSAI 2

Couche	Nucléodensimètre			Tube Shelby			Température (°C)	Pénétromètre (kg/cm ²)
	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)		
2A	1759,3	20,7	1590,8	1940,7	31,6	1475,2	32	> 4,84
2B	1870,1	25,0	1496,1	1839,6	32,8	1385,3	34	> 4,84
3A	1894,2	23,5	1536,2	1894,2	34,0	1414,2	40	> 4,84
3B	1768,9	20,5	1467,2	1740,0	34,0	1298,6	42	> 4,84
4A	1849,2	21,7	1518,5	1825,1	34,5	1356,4	36	> 4,84
4B	1809,1	21,5	1488,0	1817,1	31,7	1380,5	32	> 4,84

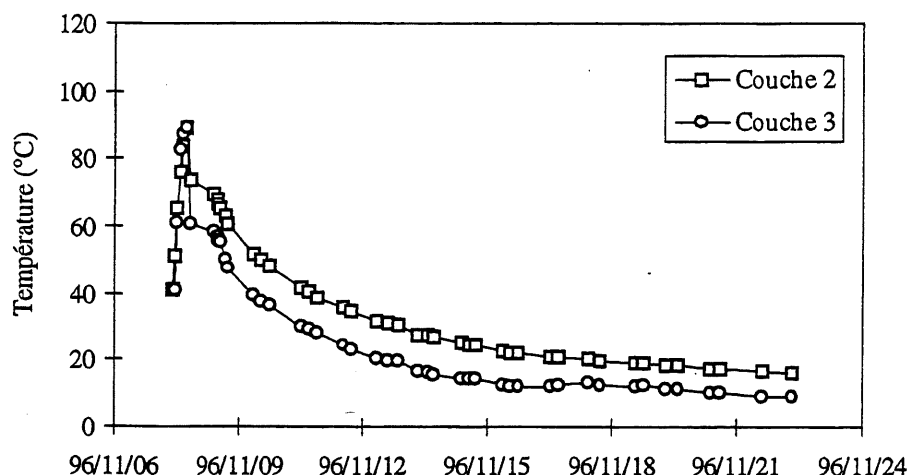


Figure 5.7 Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 2

Après 28 jours de mise en place, cette cellule a fait l'objet d'études identiques à la cellule 1 et le tableau 5.11 résume les résultats accumulés des différents essais:

TABLEAU 5.11 RÉSULTATS MÉCANIQUES, HYDRAULIQUES ET DE LESSIVAGE - BANC D'ESSAI 2

Paramètre	Critère	A	B	C	D
C0 (MPa)	1	4,1	4,3	3,7	4,8
K (cm/s)	10×10^{-7}	$3,7 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$
Alcalinité (mg/l)	---	310	110	77	210
T.D.S. (mg/l)	---	2 600	3 300	2 200	2 900
Sulfates (mg/l)	---	960	1 200	1 600	1 500
Calcium (mg/l)	---	270	190	180	280
Plomb ($\mu\text{g/l}$)	4	1	2	< 1	< 1
Magnésium ($\mu\text{g/l}$)	---	< 100	< 100	600	< 100
Mercure ($\mu\text{g/l}$)	2,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Potassium ($\mu\text{g/l}$)	---	620 000	520 000	620 000	760 000
Sélénium ($\mu\text{g/l}$)	35	< 5	< 5	< 5	9
Sodium ($\mu\text{g/l}$)	150 000	94 000	97 000	74 000	90 000

5.3.7 Cellule 3: KG6 + 10%CV Edgewater

Après 30 minutes entre l'épandage et le compactage, la température a été de 40 °C. On a utilisé un camion *pulvimixeur* pour ajuster la perte en eau entre les couches due au taux d'évaporation. La température n'a pas dépassé 80 °C (Figure 5.8). La surface finale était uniforme et sans fissures apparentes. Après 48 heures, de faibles fissures discontinues de largeur 1 à 2 mm sont apparues.

TABLEAU 5.12 PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE MISE EN PLACE - BANC D'ESSAI 3

Couche	Nucléodensimètre			Tube Shelby			Température (°C)	Pénétromètre (kg/cm ²)
	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)		
1A	1674,2	18,1	1419,0	1638,9	33,6	1228,0	36	> 4,84
1B	1706,3	19,0	1433,5	1573,1	34,7	1167,0	32	> 4,84
2A	1699,9	19,8	1419,0	1645,3	34,7	1221,6	40	> 4,84
2B	1630,9	17,1	1393,3	1536,2	32,3	1162,2	36	3,77
3A	1682,3	21,8	1380,5	1683,9	36,5	1234,4	32	> 4,84
3B	1576,3	17,2	1343,6	1544,2	31,6	1173,4	38	> 4,84
4A	1704,7	19,0	1433,5	---	---	---	---	> 4,84
4B	1616,4	20,3	1343,6	---	---	---	---	> 4,84

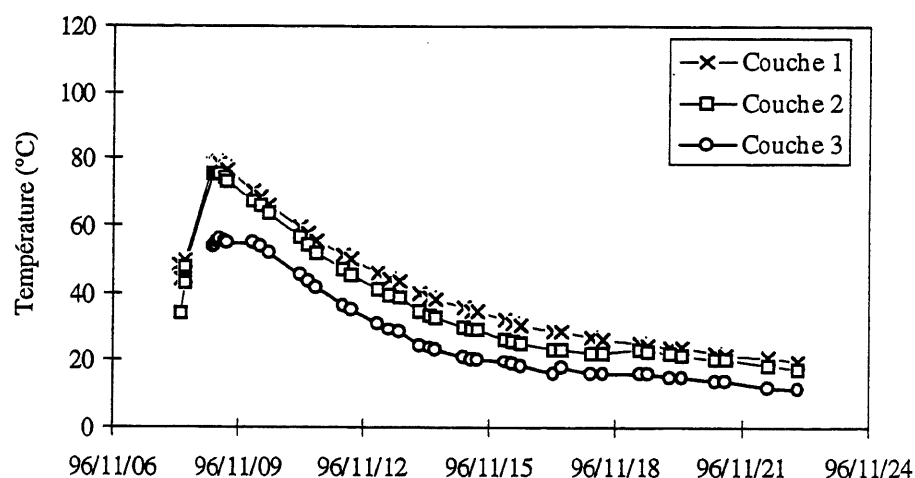


Figure 5.8 Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 3

Les résultats des investigations après 28 jours sont présentés au tableau 5.13.

TABLEAU 5.13 RÉSULTATS MÉCANIQUES, HYDRAULIQUES ET DE LESSIVAGE - BANC D'ESSAI 3

Paramètre	Critère	A	B	C	D
C0 (MPa)	1	4,6	19,3	5,6	17,9
K (cm/s)	10×10^{-7}	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-5}$
Alcalinité (mg/l)	---	97	87	120	120
Fluor (mg/l)	2,1	1,1	1,3	1,3	1,2
T.D.S. (mg/l)	---	2 400	2 400	2 100	2 100
Sulfates (mg/l)	---	1 700	1 700	1 000	870
Calcium (mg/l)	---	130	120	360	180
Chrome (µg/l)	120	9	6	< 3	< 3
Plomb (µg/l)	4	< 1	< 1	< 1	< 1
Magnésium (µg/l)	---	10 000	19 000	< 100	28 000
Mercuré (µg/l)	2,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Potassium (µg/l)	---	680 000	630 000	460 000	450 000
Sélénium (µg/l)	35	6	8	< 5	< 5
Sodium (µg/l)	150 000	99 000	110 000	76 000	84 000

5.3.8 Cellule 4: KG5 + 10%CV Edgewater

La même procédure de mise en place que la cellule 3 a été appliquée à la réalisation de cette planche. Malgré celà, nous avons observé la formation de fissures similaires à celles de la cellule 1. La température a atteint 100 °C et a diminué lentement avec le temps (Figure 5.9). Après 15 jours, les températures sont restés autour de 30 °C.

TABLEAU 5.14 PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE MISE EN PLACE - BANC D'ESSAI 4

Couche	Nucléodensimètre			Tube Shelby			Température (°C)	Pénétromètre (kg/cm ²)
	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)		
2A	1788,2	19,6	1496,1	1794,6	32,6	1353,2	33	> 4,84
2B	1735,2	20,1	1444,7	1701,5	29,5	1313,1	36	> 4,84
3A	1743,3	18,9	1467,2	1671,0	30,9	1276,1	42	> 4,84
3B	1664,6	17,4	1417,4	1457,5	29,8	1123,6	54	4,84
4A	1752,9	19,1	1470,4	1781,8	30,5	1366,0	36	> 4,84
4B	1720,8	16,4	1480,0	1821,9	27,3	1431,8	38	> 4,84

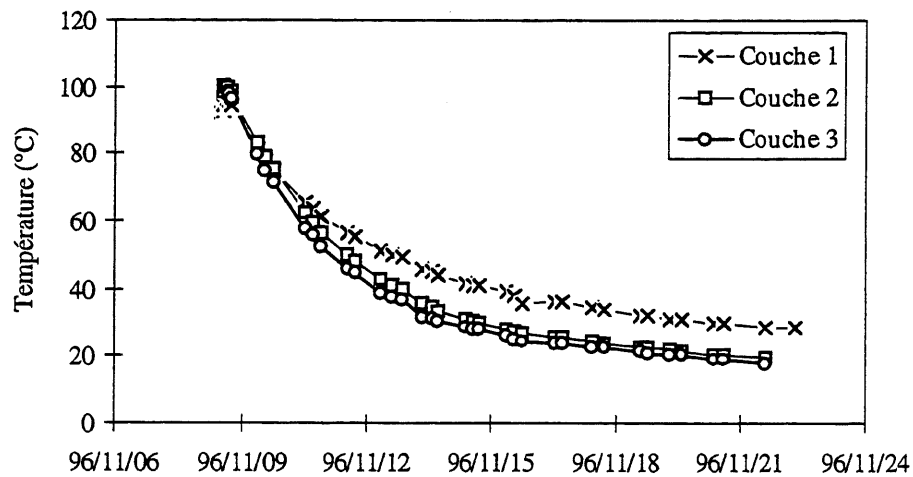


Figure 5.9 Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 4

Les essais à 28 jours ont donné les résultats du tableau 5.15.

TABLEAU 5.15 RÉSULTATS MÉCANIQUES, HYDRAULIQUES ET DE LESSIVAGE - BANC D'ESSAI 4

Paramètre	Critère	A	B	C	D
C0 (MPa)	1	1,5	2,3	2,4	2,8
K (cm/s)	10×10^{-7}	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$
Alcalinité (mg/l)	---	200	370	190	160
Fluor (mg/l)	2,1	0,9	0,9	0,9	0,8
T.D.S. (mg/l)	---	2 600	2 700	2 600	2 500
Sulfates (mg/l)	---	920	890	900	950
Calcium (mg/l)	---	260	280	250	210
Chrome (µg/l)	120	< 3	< 3	< 3	< 3
Plomb (µg/l)	4	1	1	4	2
Magnésium (µg/l)	---	< 100	< 100	< 100	13 000
Mercure (µg/l)	2,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Potassium (µg/l)	---	660 000	690 000	660 000	640 000
Sélénium (µg/l)	35	5	7	6	< 5
Sodium (µg/l)	150 000	87 000	87 000	92 000	99 000

5.3.9 Cellule 5: KG6 + 10%CV Nanticoke

La mise en place de cette cellule a été réalisée avec une teneur en eau (39%) du côté humide de l'optimum Proctor. Comparée aux autres cellules, elle n'a pas montré de fissuration et les températures n'ont pas excédés 40 °C. Après 4 jours, la température à l'intérieur de la planche a été identique à la température ambiante (Figure 5.10).

TABLEAU 5.16 PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE MISE EN PLACE - BANC D'ESSAI 5

Couche	Nucléodensimètre			Tube Shelby			Température (°C)	Pénétromètre (kg/cm ²)
	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_h (kg/m ³)	w (%)	ρ_s (kg/m ³)		
2A	1778,6	29,0	1378,9	---	---	---	---	---
2B	1712,8	26,6	1403,0	---	---	---	---	---
3A	1777,0	25,4	1417,4	1741,7	39,9	1244,0	30	3,77
3B	1701,5	24,3	1369,2	1675,8	39,1	1205,5	32	3,77 - 4,31
4A	1674,2	23,5	1354,8	---	31,6	---	30	> 4,84
4B	1704,7	23,1	1385,3	---	34,9	---	30	> 4,84

Les résultats après 28 jours sont reportés au tableau 5.17.

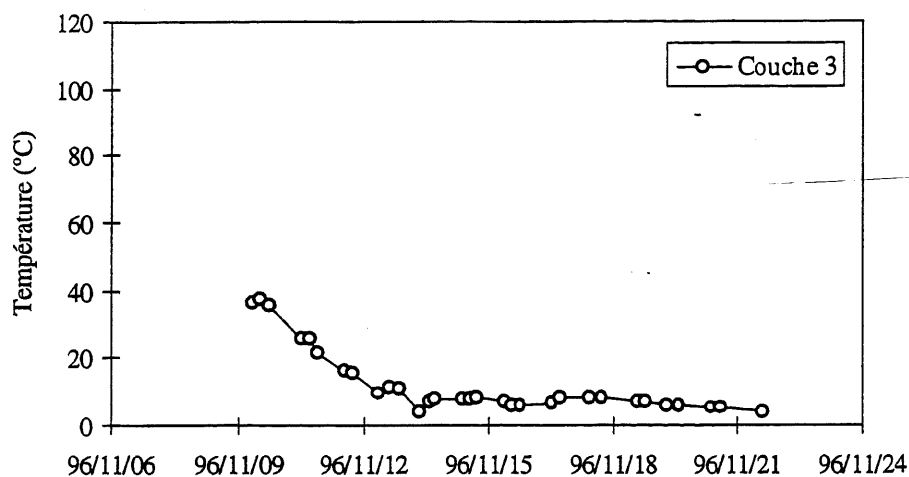


Figure 5.10 Températures mesurées dans les différentes couches du banc d'essai 5

TABEAU 5.17 RÉSULTATS MÉCANIQUES, HYDRAULIQUES ET DE LESSIVAGE - BANC D'ESSAI 5

Paramètre	Critère	A	B	C	D
C0 (MPa)	1	8,0	12,6	11,4	8,0
K (cm/s)	10^{-7}	$1,9 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$
Alcalinité (mg/l)	---	19	62	82	120
T.D.S. (mg/l)	---	2 000	2 800	2 400	2 900
Sulfates (mg/l)	---	930	1 000	960	1 000
Calcium (mg/l)	---	200	170	160	190
Plomb ($\mu\text{g/l}$)	4	< 1	< 1	< 1	< 1
Magnésium ($\mu\text{g/l}$)	---	28 000	2 300	2 600	160
Mercuré ($\mu\text{g/l}$)	2,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 2,0
Potassium ($\mu\text{g/l}$)	---	390 000	670 000	630 000	810 000
Sélénium ($\mu\text{g/l}$)	35	< 5	6	< 5	8
Sodium ($\mu\text{g/l}$)	150 000	83 000	100 000	95 000	100 000

5.4 Synthèse

5.4.1 Masses volumiques

Les masses volumiques humides ont été facilement mesurées avec un nucléodensimètre et le tube de Shelby. Bien que le nucléodensimètre soit fiable pour la détermination de la masse volumique, ce n'est pas le cas pour la détermination de la teneur en eau. En conséquence, le séchage au four ou au four à micro-ondes (environ 15 min.) s'est avéré nécessaire pour déterminer de façon acceptable la masse volumique sèche.

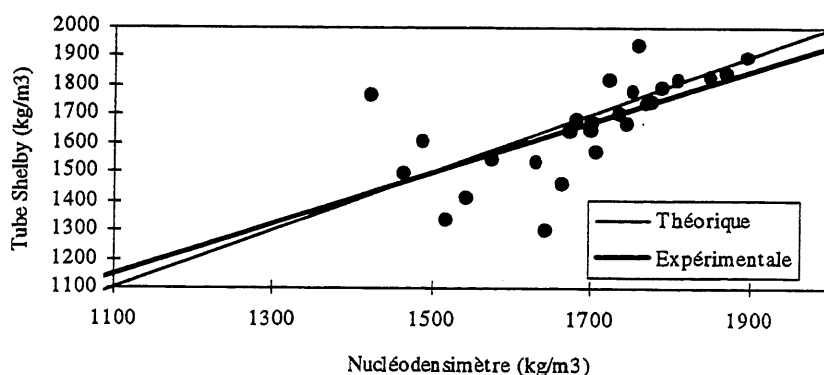


Figure 5.11 Corrélation entre les masses volumiques Shelby-nucléodensimètre

5.4.2 Températures

Les températures élevées ont un effet accélérateur en modifiant la cinétique des réactions d'hydratation et contribuent à augmenter le dégagement de chaleur. En effet, le taux d'évaporation d'eau en surface augmente, accélère initialement l'hydratation et ensuite l'arrête lorsque la perte d'eau est importante. Cette différence de teneur en eau entre le cœur et la surface des couches cause la dessiccation.

Quand la chaux s'hydrate pour former la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le volume molaire double. Cette hydratation favorise le délaminage formant des pyramides en surface.

La barrière à base de poussière de four de cimenterie Exshaw5+10%CV Exshaw sans ajouts de ciment présente un aspect boueux en surface juste après la période du dégel. Il apparaît des fissures superficielles de quelques millimètres d'ouverture avec une profondeur allant jusqu'à 1

cm. Cette particularité provient des différentes réactions d'expansion. L'effet néfaste généré par les cycles gel-dégel peut être annulé par la mise en place d'une couche de terre végétale. Pour des conditions climatiques comparables à celles de la ville de Sherbrooke, une hauteur moyenne de 60 cm peut s'avérer efficace.

5.4.3 Résistance à la compression

Les propriétés mécaniques déterminées sur des éprouvettes prélevées dans les bancs d'essai ont montré des résistances à la compression variant entre 2 et 19 MPa. Ces valeurs sont relativement faibles par rapport à celles obtenues sur les échantillons compactés en laboratoire. Cette différence peut être expliquée par une faible compaction opérée sur le terrain et par la présence de microfissures causées probablement par l'élévation de la température.

5.4.4 Perméabilité

Le contrôle de la perméabilité in situ déterminé directement à partir des mesures dans les bancs d'essai et aussi sur des échantillons prélevés par carottage sur toute l'épaisseur et en profondeur de la couche compactée a montré que le rapport $K_{\text{chantier}}/K_{\text{laboratoire}}$ est de l'ordre de 10 à 100. Dans ce cas, un coefficient de sécurité de 10 est à prendre en considération.

6 ANALYSE ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre présente la synthèse des résultats et les recommandations. Une attention particulière sera donnée au guide de mise en place et de contrôle du site.

6.1 Mélanges recommandés

En se basant sur la composition nominale d'une cinquantaine d'échantillons de poussière de cimenterie provenant de différents horizons, un diagramme ternaire faisant appel aux principales phases minéralogiques a été élaboré en laboratoire (Fig 6.1).

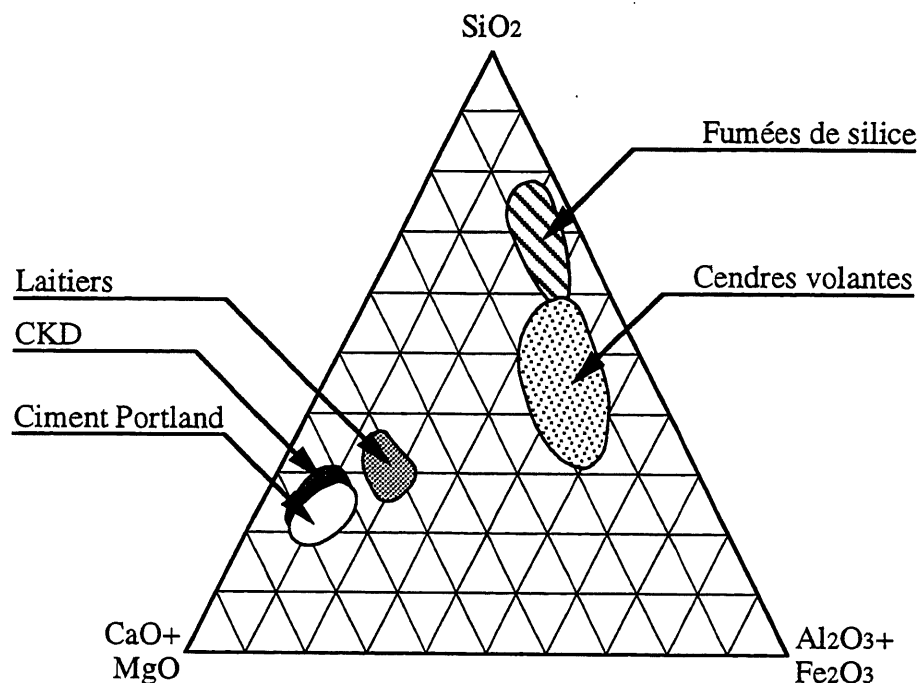


Figure 6.1 Comparaison des CKD dans le diagramme ternaire

Le choix a été orienté vers quatre types de poussière, Brookfield, Exshaw4, Exshaw5 et Alpena, ayant des caractéristiques (composition, minéralogie) les plus différentes possibles, en particulier, la chaux libre. Hormis la poussière de Brookfield, les essais effectués pour stabiliser et consolider les autres CKD sans ajout minéral se sont révélés impossibles. En effet, quel que soit le mode de compactage adopté, aucune amélioration significative n'a été révélée. Ceci a rendu indispensable l'ajout d'agents pouzzolaniques.

Le tableau 6.1 présente les mélanges recommandés pour les barrières de recouvrement ou d'étanchéité.

TABLEAU 6.1 RECOMMANDATION DES MÉLANGES SELON L'UTILISATION

Poussière	Chaux libre (%)	Cendres volantes (10%)	Ciment type 10 (%)	Mélange pour une barrière	
				recouvrement	étanchéité
Exshaw5	40	Type F	2	Oui	Oui
	40	Type F	0	Non	Oui
Exshaw4	10	Type C	0	Non	Oui
Brookfield	3,7	Pas d'ajout	0	Non	Oui
Alpena	15	Type F	0	Non	Oui

Les résultats ne sont pas généralisables aux différents types de poussières de four de cimenterie. En fonction de l'utilisation envisagée pour la barrière et de ses performances recherchées, le mélange approprié peut être choisi selon la chimie de la poussière et du type de CV; la compatibilité des ajouts et des CKD pourrait être évaluée en considérant les variétés présentées dans ce travail et des mélanges élaborés.

6.2 Guide de mise en place et de contrôle du site

Ces résultats en laboratoire ont permis d'entreprendre la vérification des performances des mélanges élaborés à plus grande échelle à l'aide de cellules de démonstration.

Connaissant les facteurs essentiels affectant la longévité de la barrière, des recommandations pour prévenir les causes pouvant altérer le rôle de la barrière hydraulique ont été émises à la conclusion du chapitre des essais pilotes en chantier.

6.2.1 Malaxage

Le malaxage doit durer de 15 à 30 min. pour atteindre une température de mise en place de 30 à 40 °C. Les mélanges doivent être répandus sur la surface de travail après malaxage. le temps d'attente recommandé est d'une à deux heures selon le volume et le type de CKD. Ce temps est suggéré pour diminuer l'intensité des réactions exothermiques et d'expansion avant la compaction.

Voici le cheminement expérimental proposé pour l'optimisation des mélanges:

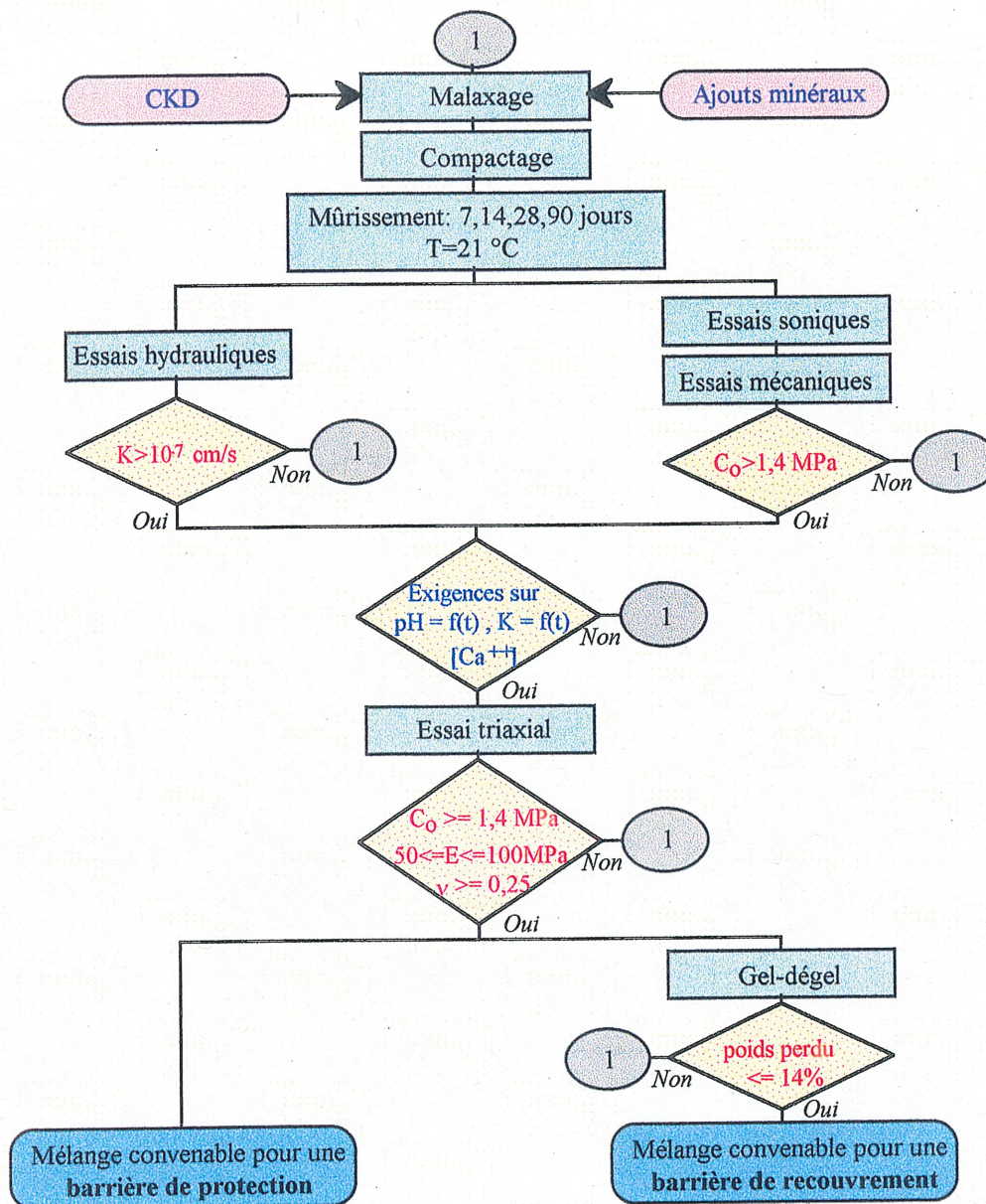


Figure 6.2 Cheminement expérimental pour l'élaboration d'un matériau stable à base de poussières de four de cimenterie

6.2.2 Teneur en eau

Afin que les membranes soient flexibles et qu'elles ne fissurent pas facilement, la teneur en eau des mélanges devrait être légèrement supérieure à la limite de plasticité qui, par définition, est la teneur en eau au delà de laquelle le matériau commence à se fissurer; la teneur en eau optimum de l'essai Proctor standard (W_{opt}) étant le plus souvent voisine de la limite de plasticité.

La teneur en eau de mise en place ne doit pas dépasser la limite de traficabilité qui est la limite supérieure de teneur en eau qui donne aux mélanges la capacité suffisante pour supporter les équipements de compactage.

6.2.3 Dimensions

L'épaisseur du revêtement peut être comprise entre 80 et 100 cm; la mise en place se fera par couches, avant compactage, de 25 à 30 cm d'épaisseur. Après un malaxage avec un matériel semblable à un malaxeur à mortier, entre autres, un pug-mill, l'épandage pourra se faire à l'aide d'une nivelleuse.

6.2.4 Énergie de compactage

Compte tenu de ce qui précède et des résultats obtenus, un compactage du côté humide de l'optimum Proctor est souhaité. L'énergie de mise en oeuvre de la barrière n'aura pas à être supérieure à l'énergie de l'essai Proctor standard. Cependant, elle devra être suffisante pour que les caractéristiques de compactage des matériaux in situ correspondent aux critères de sélection du diagramme élaboré dans le cadre de cette étude.

Les méthodes de contrôle et de suivi devraient être associées à des examens visuels pour s'assurer que le mélange est compacté en une pâte homogène, sans vides apparents.

6.2.5 Curage

Suivant la mise en place, un arrosage d'eau pourra être réalisé par période de chaleur et de temps sec si un risque d'assèchement trop brusque est appréhendé. Bien compacter, sans aller au delà de l'optimum Proctor, la partie supérieure de la barrière, afin que les eaux de pluies ne

puissent lixivier profondément le matériau. Il est clair que cette couche est la plus exposée aux soulèvements dus au dégagement de vapeur d'eau (dans le cas où l'hydratation initiale de la chaux libre est encore intense). Il faudra éviter l'excès d'eau au cours des 48 heures qui suivent la mise en place, afin d'éviter tout lessivage avant la prise finale. Par contre, il faudra maintenir humide la couche de surface après 48 heures et ce, pour une période allant de 7 à 10 jours.

L'utilisation d'un mélange en tant que barrière ou en traitement de masse peut être reliée au contexte géologique et hydrogéologique du site, ainsi qu'à l'importance de l'impact sur le milieu naturel et, plus particulièrement, sur les eaux souterraines. Dans le cas où la réalisation est sur un sol perméable, contenant une nappe phréatique qui communique directement avec une rivière ou un lac, ou qui est exploité pour des fins domestiques et agricoles, seuls des mélanges ayant une faible quantité de substances lessivables pendant les premiers jours de fonctionnement seront considérés.

6.2.6 Surveillance durant la mise en place et le fonctionnement à long terme

La surveillance des travaux de construction et le suivi des performances subséquentes de la barrière ou de traitement de masse revêt une grande importance. Ceci permet, en outre, de statuer sur le bien fondé des critères de conception, d'évaluer la stabilité réelle de l'ouvrage, de comparer le comportement en place avec les prévisions du concepteur et de fournir des informations pour les améliorations futures.

Le contrôle de la qualité et de conformité, pendant la construction, doit permettre de toucher les éléments suivants:

- le respect des dosages recommandés pour les différents matériaux;
- l'homogénéité du mélange;
- le respect des valeurs du rapport E/M recommandées;
- le respect des modalités de mise en place: vibration ou compactage, mûrissement, etc.;
- la réalisation d'essais de performances mécaniques, hydrauliques et de longévité sur des échantillons prélevés dans les barrières après construction.

Plusieurs paramètres doivent être mesurés durant la mise en place des poussières de four de cimenterie:

- inspection visuelle, puisque les manifestations anormales de surface permettent de prendre les premières mesures correctives;
- mesures de densité in situ par la méthode du cône de sable (norme CAN/BNQ 2501-060-M-86) ou par nucléodensimètre;
- mesures des teneurs en eau du matériau lors du malaxage (norme CAN/BNQ 2501-170-M-86);
- contrôle de l'homogénéité du mélange après malaxage par prélèvement d'échantillons et analyse radiocristallographique.

Le suivi est basé sur des mesures ponctuelles à raison d'un ou plusieurs contrôles selon le type d'instrument et selon les informations demandées par les responsables de l'environnement.

Un ensemble instrumental conçu à l'avance incluant des thermocouples, des tubes à oxygène, des repères de nivellement, des sondes de conductivité ainsi que des piézomètres seront installés à différents endroits et profondeurs afin de suivre de façon non destructive le comportement de la barrière développée et de confirmer son efficacité pendant le fonctionnement.

a) Thermocouples

Étant un paramètre régissant la stabilité de la barrière développée, la température sera mesurée en continue afin de suivre l'effet thermique généré par les réactions d'hydratation, essentiellement celle de la formation de la portlandite.

Sachant que le temps d'attente est primordial pour une meilleure mise en place, la température sera inférieure à 30-40 °C.

b) Tubes à oxygène

Le suivi du profil de l'oxygène dans la barrière peut être mis à profit pour vérifier l'infiltration et, par conséquent, la perméabilité du système. Pour ce faire, des tubes à oxygène seront installés à différentes profondeurs dans des trous de 102 mm (4 pouces) de diamètre avec

des intervalles de 30 cm. Après carottage, chaque tube sera placé à la profondeur correspondante dans du sable d'Ottawa (hauteur 5 cm) sur lequel sera ajouté un bouchon de bentonite selon la description reportée sur la figure 6.3. Le tube à oxygène sera fermé à l'aide d'un septum.

Les mesures s'effectueront à l'aide d'un analyseur d'oxygène Servomax certifié ISO 9001 avec une précision de 0,1%. Les fréquences de mesures seront fixées à un contrôle tous les deux mois.

c) Sondes de conductivité

Les sondes conçues et étalonnées au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke permettront de vérifier la qualité de l'eau interstitielle de façon non destructive. Les détails de ce dispositif expérimental sont reportés sur la figure 6.4. Dans le cas des poussières de four, cette mobilité ionique sera assurée majoritairement par les alcalins et les alcalino-terreux.

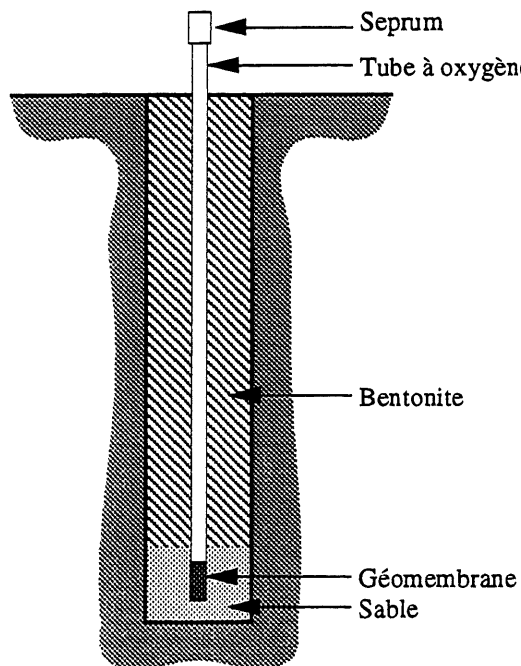


Figure 6.3 Installation du tube à oxygène

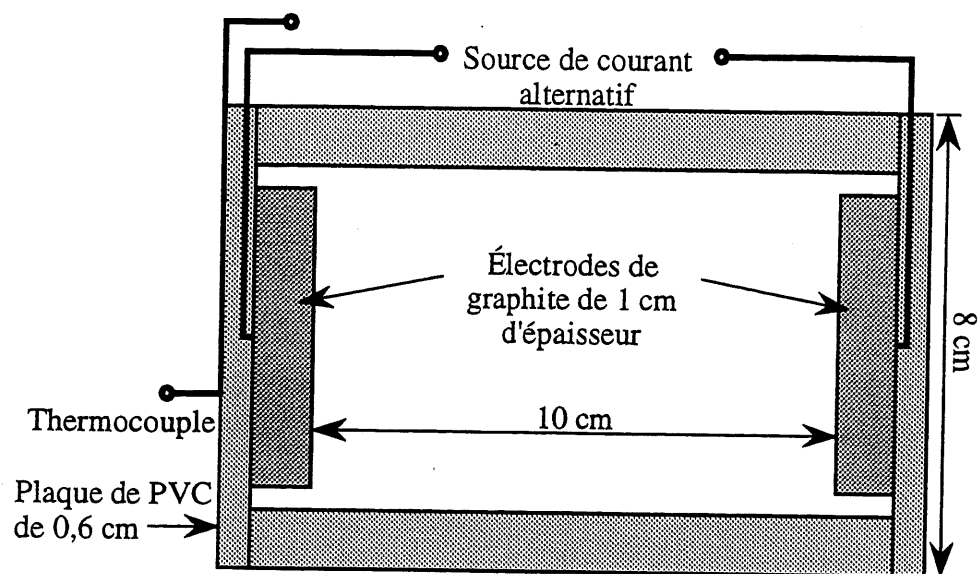


Figure 6.4 Schéma de la sonde pour la mesure de la conductivité

d) Extensomètres

Des extensomètres type LVDT installés sur des plaques permettront le suivi de tout phénomène pouvant générer des expansions. Il est clair que ces gonflements sont produits par des réactions chimiques telles que la formation de l'ettringite secondaire, du gypse. Dans le cas des poussières de four d'Exshaw, l'expansion est générée principalement par la portlandite néoformée. Ce paramètre peut être suivi par un dispositif utilisant les rayons laser surtout dans le cas où ce dispositif est disponible au niveau des cimenteries.

e) Piézomètres

Pour la récupération des eaux de lixiviation, deux choix s'imposent: soit l'installation de drains agricoles enrobés dans la couche de sable selon un plan préétabli, soit recourir à l'installation de piézomètres munis de pompe Watéra, au voisinage des barrières.

Les eaux de percolation recueillies à l'aide de la pompe Watéra dans le piézomètre crépiné permettront des analyses chimiques de certains éléments chimiques les plus significatifs afin de vérifier l'efficacité de la barrière. Les détails de cet ensemble sont représentés sur la figure 6.5.

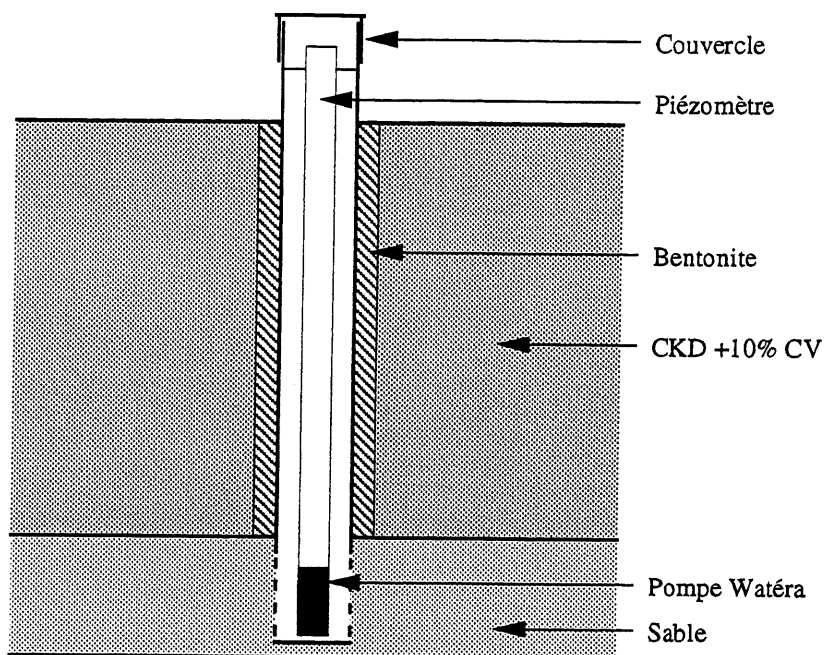


Figure 6.5 Piézomètre pour la récupération

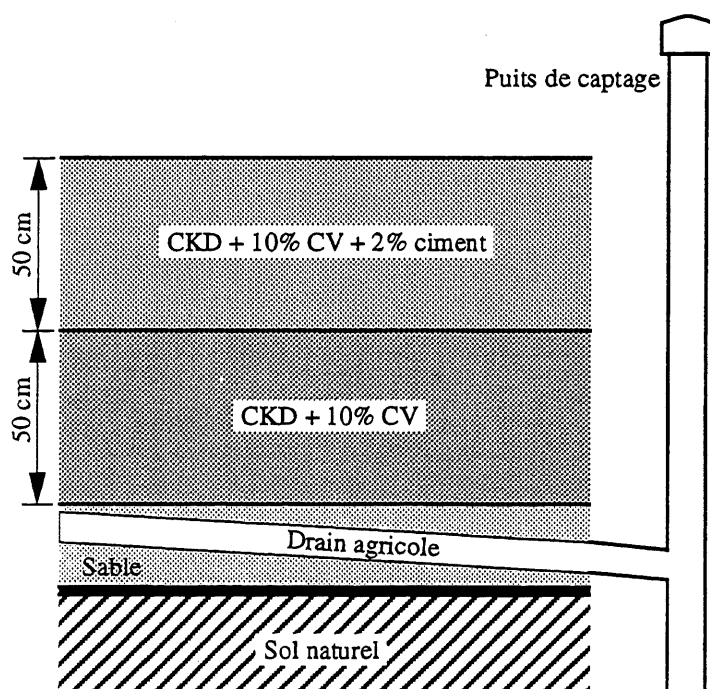


Figure 6.6 Installation des drains agricoles et les puits de captage

6.2.7 Configuration des barrières recommandées

Le mode de traitement de masse pour le remplissage et la configuration des barrières de protection ou de recouvrement varient selon le degré de toxicité des déchets à entreposer. Un système de barrières simples sera utilisé dans le cas de faible toxicité alors qu'un système double est nécessaire quand il s'agit de déchets de moyenne ou grande toxicité selon les critères du ministère de l'Environnement [MENVIQ, 1988]. L'annexe 1 relate les critères d'autres ministères.

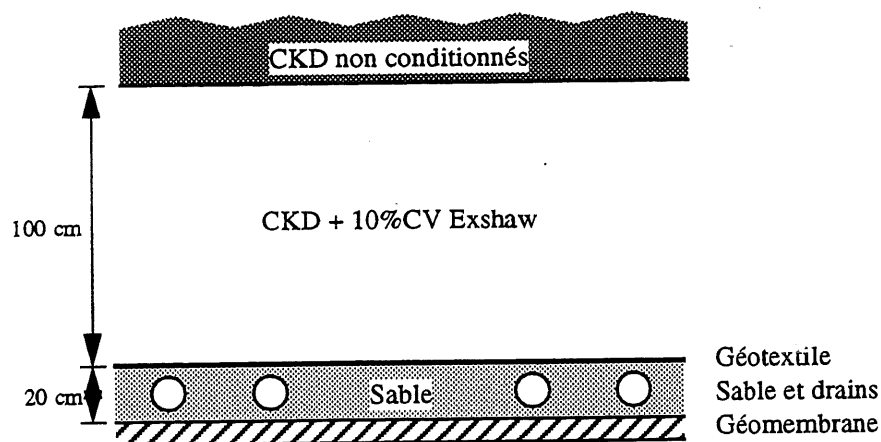


Figure 6.7 Schéma de la barrière double à base du mélange CKD+10%CV

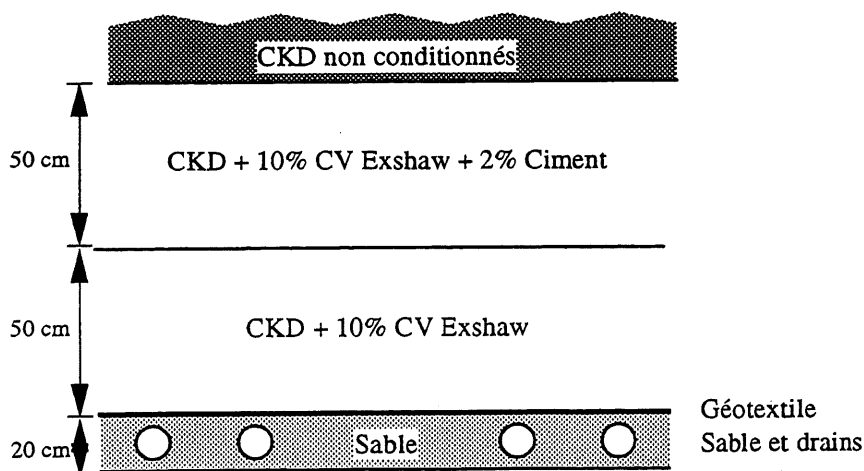


Figure 6.8 Schéma de la barrière double à base du mélange CKD+10%CV+2%C

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tel que mentionné en introduction, le but principalement visé par cette étude est la détermination de formulations optimisées à base de différentes poussières de four susceptibles d'être extrapolées à d'autres systèmes de caractéristiques similaires pour réaliser des barrières environnementales.

Les trois points suivants illustrent l'originalité de cette étude:

- quatre types de CKD (Brookfield, Alpena, Exshaw4 et Exshaw5) et différents types de cendres volantes ont été étudiés en parallèle;
- l'évaluation des performances réelles des mélanges retenus;
- l'élaboration d'un guide de mise en place et de contrôle du site.

La méthodologie adoptée a consisté, dans un premier temps, à faire des essais en laboratoire sur différentes formulations comportant des poussières de four, cendres volantes et ciment. Hormis Brookfield, il apparaît que les meilleurs résultats sont obtenus avec les combinaisons CKD+10%CV et CKD+10%CV+2%C selon la teneur en chaux libre et le type de cendres volantes. Le deuxième volet a permis l'extrapolation de ces formulations à plus grande échelle en faisant appel à des cellules de démonstration munies d'un ensemble instrumental nécessaire pour le suivi des paramètres clés.

Connaissant la nature des phases contrôlant la consolidation et la stabilisation, quatre types de poussières de four représentatives avec des teneurs variables en chaux libre (CaO) et oscillant entre 0 et 40% ont permis de dégager un cheminement applicable à d'autres systèmes ayant des teneurs en chaux libre inférieures à 40%.

Afin de cerner de façon rigoureuse la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ce type de réaction, des diagrammes ternaires faisant appel aux principales composantes chimiques ont été dressés, ce qui a permis de délimiter le domaine d'existence des poussières de four.

En réponse aux exigences des normes environnementales établies, les barrières développées se caractérisent par de bonnes performances physico-mécaniques et environnementales.

Les différentes investigations menées sur les essais d'optimisation avec compactage en présence de liants hydrauliques ont montré qu'il est possible d'atteindre des stabilités parfois comparables à celle d'un ciment Portland. En effet, la synthèse des études de l'optimisation des mélanges au laboratoire en respectant le mode opératoire décrit dans ce travail, conduit au choix des formulations suivantes:

- poussière Exshaw5 avec 40% de chaux libre → Exshaw5+10%CV Exshaw+2%Ciment
→ Exshaw5+10%CV Exshaw
- poussière Exshaw4 avec 10% de chaux libre → Exshaw4+10%CV Saint-Clair
- poussière Brookfield avec 3,7% de chaux libre → Brookfield (sans ajouts)
- poussière Alpena avec 15% de chaux libre → Alpena+10%CV Nanticoke

Même si les réactions de formation de l'ettringite, de la syngénite et du gypse sont exothermiques, cette particularité semble bien liée à l'importance de la présence de la chaux, qui après hydratation, entraîne un effet exothermique pouvant générer des températures dépassant parfois les 100°C.

Outre cet effet thermique, les quatre phases minéralogiques reconnues comme étant expansives sont susceptibles de présenter des gonflement suivis parfois par l'apparition de fissures. Des températures trop élevées sont aussi propices à l'apparition de ce type de défaut. En ce sens, les nombreux essais effectués en laboratoire et confirmés en chantier ont montré qu'il est possible de réduire, voire annihiler, ces phénomènes thermiques et expansifs. Cette amélioration se traduit par le contrôle du temps de malaxage et d'attente avant la mise en place. Il a été suggéré que 15 minutes de malaxage et environ 2 heures d'attente sont nécessaires et suffisants pour permettre d'éviter à la source ces deux inconvénients.

La détermination des propriétés mécaniques n'a fait que corroborer ces observations puisque les performances obtenues sont acceptables et elles se situent autour de 12 à 14 MPa

après 56 jours de mûrissement pour les échantillons élaborés en laboratoire et de 2 à 6 MPa pour les carottes prélevées sur les bancs d'essai.

Ces formulations trouvent leur justification dans les résultats issus des essais de perméabilité réalisés en laboratoire et in situ dans les cellules de démonstration. En comparaison avec les normes environnementales en vigueur, les barrières développées se caractérisent avec des valeurs inférieures ou égales à 10^{-7} cm/s, valeurs admissibles pour une utilisation éventuelle de ces matériaux en tant que barrière environnementale ou "liner".

En effet, en circulation radiale divergente, la perméabilité a montré, en général, une décroissance initiale rapide qui se ralentit progressivement. L'évolution de cette dernière est une fonction de la vitesse d'hydratation des mélanges: les coefficients de colmatage C_m et C_{max} sont pratiquement égaux, ce qui signifie une diminution progressive de la perméabilité due à une réduction régulière de la porosité et à l'absence de tout phénomène de décolmatage par dissolution ou entraînement de particules. Les essais ont montré aussi une relation inverse entre la perméabilité et la teneur en eau initiale (E/M). Les perméabilités mesurées in situ ont montré que le rapport $K_{\text{chantier}}/K_{\text{laboratoire}}$ est de l'ordre de 10 à 100. Il paraît nécessaire de considérer un coefficient de sécurité modéré de 10 permettant de prendre en compte les conditions de chantier et celles du laboratoire.

L'analyse chimique des différents lixiviats récupérés durant les mesures de perméabilité et les essais de TCLP rallie tout à fait ces résultats. En effet, les teneurs en métaux lourds, métaux de transition et les éléments à risque pour les milieux récepteurs sont en dessous des critères établis par le MENVIQ et l'EPA. Les résultats de l'étude de lessivage au perméamètre ou par TCLP témoignent qu'une fois l'hydratation terminée, le lessivage correspond à un simple lavage de barrières des ions libérés ou restant en excès. Ce phénomène est, dans tous les cas, constant ou diminue avec le temps, ce qui explique en partie la dissolution et traduit, par conséquent, une bonne longévité des mélanges. En ce qui concerne les teneurs en plomb, les résultats montrent que les concentrations sont inférieures à 5 ou 6 mg/l.

L'évaluation de l'efficacité environnementale, en termes de concentrations de contaminants qui traversent la barrière, a montré que la forte alcalinité constitue un système d'autoprotection qui bloque la migration par diffusion des métaux en provoquant leur précipitation au-dessus de la barrière. Cependant, les simulations pour l'évaluation du temps au-delà duquel la barrière perd totalement son rôle d'écran atténuateur ont montré que l'épaisseur du "liner" doit être supérieure ou égale à 1 mètre.

Malgré les efforts consentis pour réaliser une barrière de recouvrement de qualité, l'effet cyclique du gel-dégel est un phénomène qui risque d'altérer son intégrité. L'une des solutions pourrait être l'utilisation de terre végétale au-dessous de la barrière et l'aménagement d'un drainage sous-jacent.

L'objectif final atteint par cette étude se traduit par l'élaboration d'un cheminement incorporant les paramètres pertinents à considérer en vue de la conception d'un matériau stable et répondant aux critères définis par la durabilité, la ductilité ainsi que par la perméabilité. En outre, un guide de mise en place et de suivi a été élaboré, il spécifie les éléments nécessaires pour la surveillance et le contrôle de toutes les opérations, pendant et après la mise en place.

Les recommandations suivantes devront être appliquées dans le but de soutenir les nombreuses recherches encore nécessaires auxquelles, certaines réponses s'imposent, pour optimiser le traitement de consolidation et de stabilisation pour un CKD donné en fonction des diverses conditions d'enfouissement. À travers ces recommandations, l'idée générale est d'arriver à un diagramme simplifié de forme pyramidale comportant les phases de sélection des principales composantes chimiques, minéralogiques et physiques des CKD et des ajouts minéraux.

- Porter une attention particulière à la quantité essentiellement réactive de verre (silicate amorphe) dans les mélanges. Un système quaternaire ayant pour sommet les oxydes alcalins, tenant compte uniquement de la teneur en chaux libre et de la silice soluble, pourrait être élaboré.

- Approfondir les connaissances du comportement physico-chimiques des poussières avant et après la stabilisation.
- Considérer d'autres types de poussières de four de cimenterie avec des teneurs variés en chaux libre. Une autre perspective est envisageable et consiste à aborder les mêmes systèmes associés à de l'argile.
- Étudier la stabilité des talus à base des mélanges développés.
- Étudier le rôle des lixiviats sur le comportement à long terme des barrières et utiliser des liquides polluants en tant que perméants pouvant provoquer une détérioration des propriétés hydrauliques et augmenter le risque d'instabilité des membranes. La compréhension de ces phénomènes permettra de formuler des recommandations pour améliorer les méthodes de mise en place, les méthodes de contrôle et finalement, le comportement des systèmes CKD-ajouts minéraux pour imperméabiliser les étangs.
- Concevoir de façon détaillée des solutions pour la protection des barrières de recouvrement contre le gel.
- Mettre au point des méthodes d'essais appropriées pour compléter le modèle de gonflement des barrières de poussières de four mûries à l'air humide ou dans l'eau.
- Établir la corrélation entre les phénomènes d'expansion et les hydrates formés.

ANNEXE 1

CONFIGURATION DES BARRIÈRES ENVIRONNEMENTALES SELON LES RÉGLEMENTATIONS

ANNEXE 1 Configuration des barrières environnementales selon les réglementations

La configuration des barrières selon les différentes réglementations est traitée globalement dans les références: Rouis (1992), Van Imp et Bouazza (1996).

D'une façon générale, un système de barrières simple sera utilisé dans le cas des déchets à faible toxicité alors qu'un système double est nécessaire quand il s'agit de déchets de moyenne ou grande toxicité selon les critères spécifiques à chaque état ou province.

Les figures suivantes illustrent certaines configurations indiquées par les références citées ci-dessus.

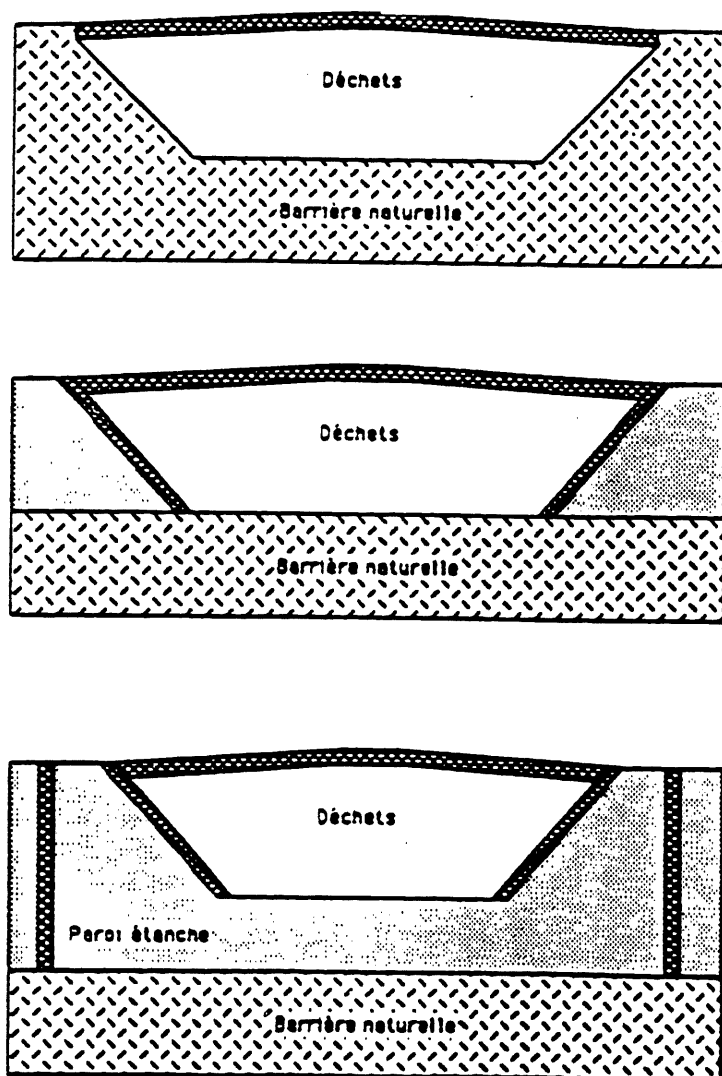


Figure A1.1 Barrières hydrogéologiques naturelles [ROUIS, 1992]

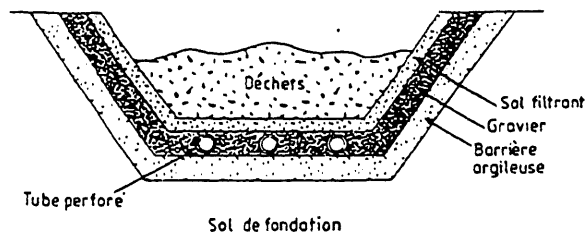


Figure A1.2 Système d'étanchéisation avec barrière simple [VAN IMP, 1996]

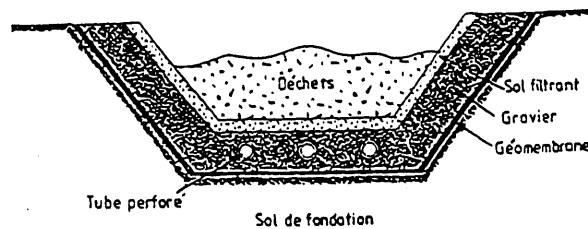


Figure A1.3 Système d'étanchéisation avec barrière en géomembrane [VAN IMP, 1996]

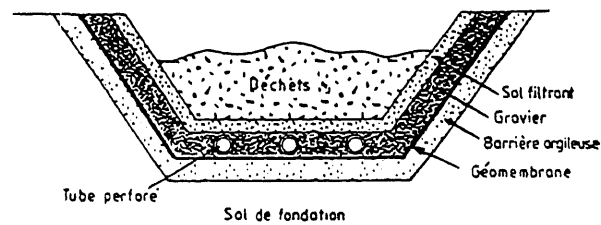


Figure A1.4 Barrière d'étanchéisation minimale aux États-Unis [VAN IMP, 1996]

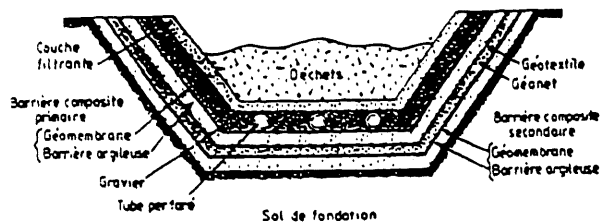


Figure A1.5 Barrière d'étanchéisation composite (double) [VAN IMP, 1996]

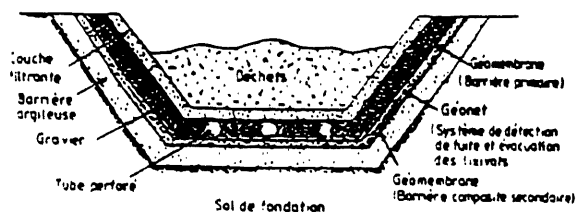


Figure A1.6 Barrière d'étanchéisation composite (double) [VAN IMP, 1996]

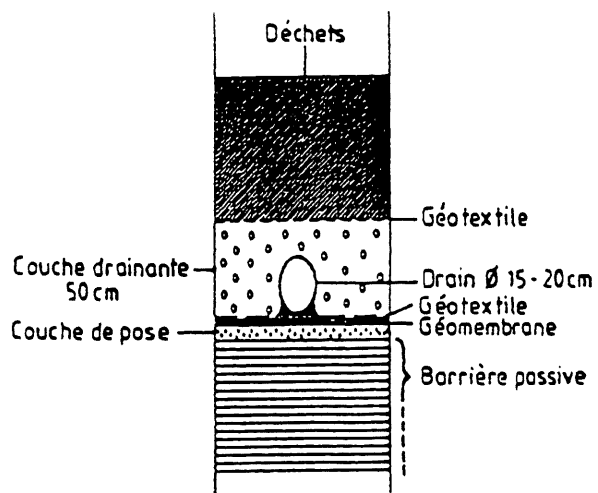


Figure A1.7 Barrière d'étanchéisation composite (simple) utilisée en France [VAN IMP, 1996]

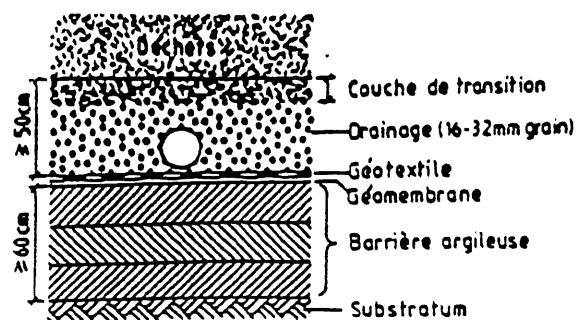


Figure A1.8 Barrière d'étanchéisation composite standard en Autriche [VAN IMP, 1996]



Figure A1.9 Exemple de géocomposite courant

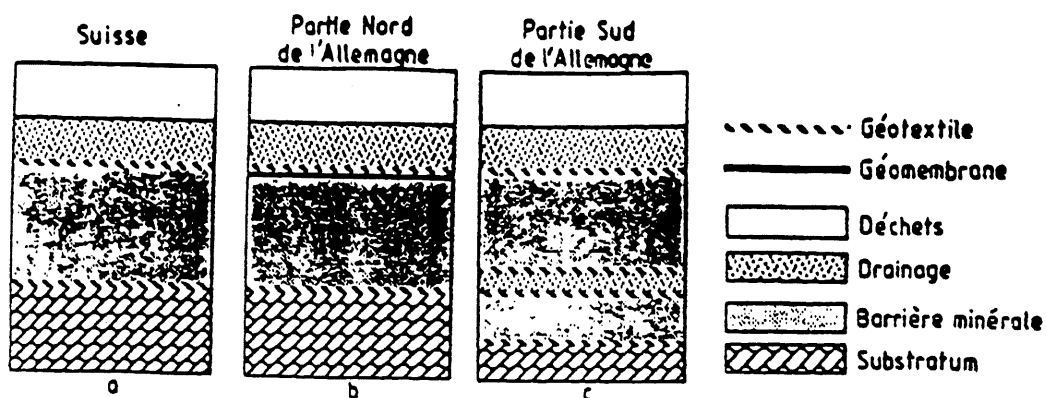
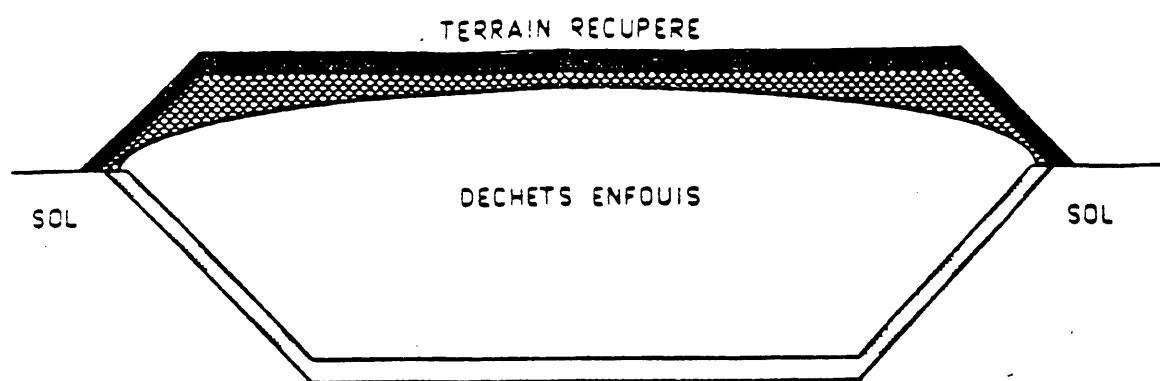
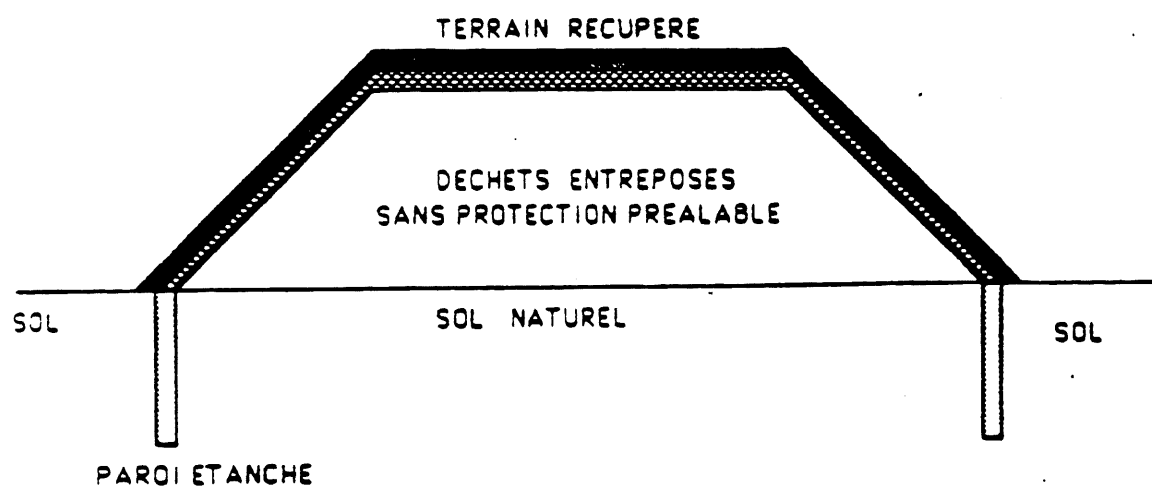


Figure A1.10 Système de construction des barrières d'étanchéisation en Suisse et en Allemagne [VAN IMP, 1996]



PREMIER CAS : PROTECTION DE NOUVEAUX SITES ET RECUPERATION DE TERRAIN



DEUXIEME CAS : FERMETURE DE SITES PREEXISTANTS




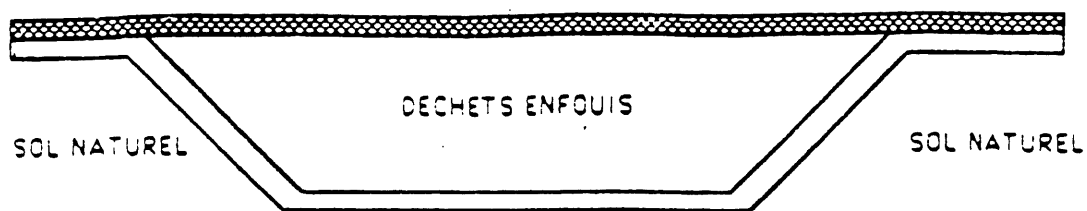
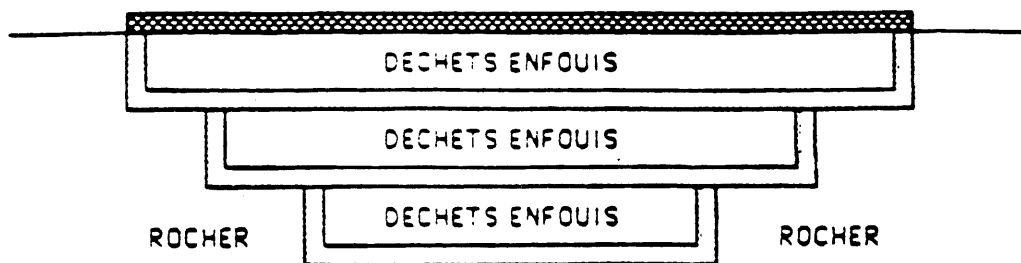
-  BARRIERE DE RECOUVREMENT : MELANGE 90-10-0 (aux cendres)
-  BARRIERE DE PROTECTION : MELANGES 100-0-5, 80-20-5 OU 90-10-1
-  TERRE VEGETALE

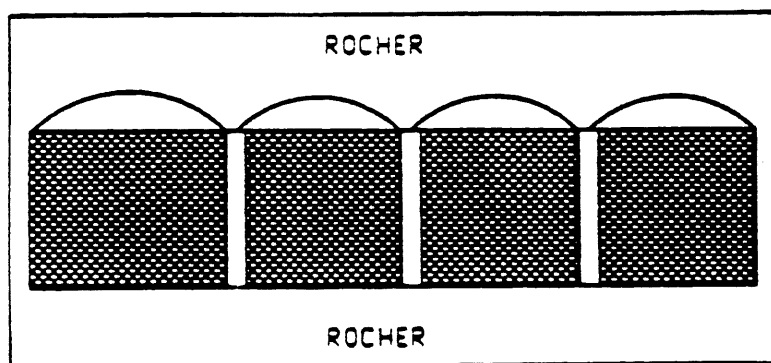
Figure A1.11 Principales fonctions des barrières en poussières de four de cimenterie dans les sites d'enfouissement [ROUIS, 1992]



PREMIER CAS : CREATION DE NOUVELLES CELLULES D'ENFOUISSEMENT



DEUXIEME CAS : COMPLEMENT DES ANCIENNES CARRIERES ET MINES A CIEL OUVERT



TROISIEME CAS : REMPLISSAGE D'ANCIENNES CHAMBRES DE MINES



-  BARRIERE DE RECOUVREMENT OU DE REMPLISSAGE . MELANGE 90-10-0 (aux cendres)
 BARRIERE DE PROTECTION MELANGES 100-0-5, 80-20-5 OU 90-10-1

Figure A1.12 Différents cas d'utilisation des barrières en poussières de four de cimenterie [ROUIS, 1992]

ANNEXE 2

MÉTHODES DE MISE EN PLACE EN CHANTIER

ANNEXE 2 Méthodes de mise en place en chantier

A2.1) Remblayage hydraulique

Le remblayage hydraulique peut être défini comme un procédé de transport d'une suspension aqueuse constituée de 10 à 20% de particules solides [SOWERS et SALLY, 1962]. Bien avant, cette conception allouée à l'utilisation des suspensions relativement plus denses avec des teneurs oscillant entre 15 et 30% de matières solides avec une granulométrie comprise entre 0,005 et 0,15 mm afin d'avoir une meilleure consolidation. Cette suggestion a été corroborée par des études rhéologiques menées sur des systèmes solides-liquides [RHOURLANE, 1986], où il a été montré une transition newtonienne-non newtonienne dépendant du diamètre et de la concentration des solides. Ce comportement rhéologique a été étayé par une modélisation en mettant à profit la loi d'Oswald. L'avantage de cette méthode hydraulique est qu'elle peut être réalisée à n'importe quel moment. Par contre, le procédé a l'inconvénient de favoriser la formation de lentilles de sable.

A2.2) Méthodes par jet d'eau

Une autre technique utilisée est l'introduction de l'eau sous pression au moyen d'un système de jets. Stokstad et Allemeir (1960) ont examiné la méthode par jets d'eau pour la construction d'un remblai sur un terrain marécageux. Comme matériau de remplissage, ils ont suggéré un sable ou un sable et gravier. Ils ont déconseillé l'utilisation de sols argileux de façon à permettre un mouvement libre de l'eau à travers le remblai.

L'objectif de ce procédé était de développer temporairement une condition de flottation dans le remblai granulaire et ce afin de produire un écoulement de l'eau permettant de réarranger les grains du sol dans un état plus compact.

A2.3) Méthode de placement d'un sol dans l'eau

Komarinskii et Bulyatov (1983) ont examiné plus de 20 barrages en URSS qui ont été construits par la méthode de placement d'un sol dans l'eau. Cette technique consiste à placer le sol dans un bassin d'eau formé par des petits remblais et par lequel la densification du sol se produit sous l'effet du poids propre des couches de sol et de l'action dynamique des camions chargés de sol passant sur la couche formée.

A2.4) Mise en place d'un sol par hydrocompaction

L'hydrocompaction d'un sol se définit comme une densification d'un sol à une teneur en eau élevée sans effort de compactage. Les ingénieurs des régions scandinaves et du Japon ayant déjà utilisé cette méthode ont discuté des raisons de son application, de certaines observations durant et après la construction ainsi que des types de sol utilisés.

Kawakami (1958) présente les variations de la teneur en eau des matériaux d'ouvrage en terre karasuyama, au Japon, durant une certaine période ainsi que les variations de précipitations et de température. La teneur en eau est fréquemment supérieure à la teneur en eau optimum obtenue de l'essai de compaction standard et que les périodes disponibles pour sécher les sols humides sont rares.

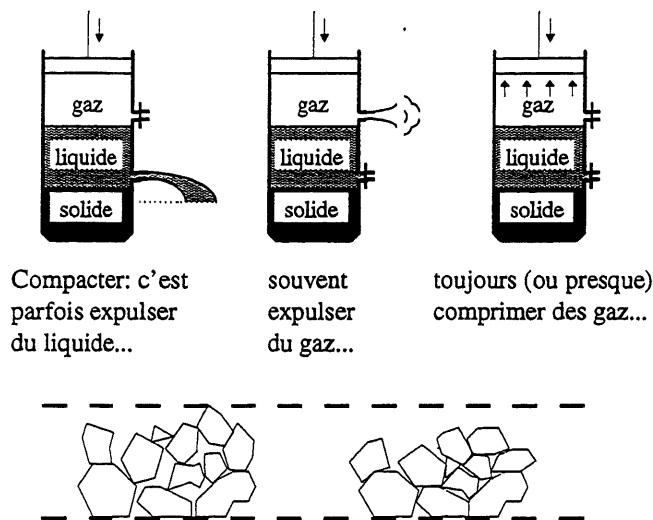
Considérant la difficulté de contrôler l'humidité du sol, les ingénieurs ont employé des rouleaux équipés avec des pieds spécialement adaptés et ont été mis à contribution pour la densification des matériaux cohésifs humides. Afin de rendre le compactage plus efficace, des matériaux à gros grains ont été mélangés aux matériaux cohésifs humides.

Shérard et coll. (1963) ont présenté les limites des courbes granulométriques des sols les plus souvent utilisées par la construction de noyaux de barrages en Suède et en Norvège. Le contrôle de la perméabilité du noyau a été satisfait en spécifiant que les matériaux utilisés ne devaient pas contenir moins que 15% en poids de particules passant le tamis 200.

A2.5) Compactage in situ

Le compactage est l'opération qui consiste à réduire l'indice des vides du sol par glissement et resserrement des grains les uns par rapport aux autres afin de rendre moins important leur arrangement ultérieur (Figure A1.1). Le compactage a pour but de:

- réduire le tassement ultérieur;
- réduire la perméabilité;
- réduire l'attrition (mouvements relatifs des grains).



Compacter: c'est
parfois expulser
du liquide...

souvent
expulser
du gaz...

toujours (ou presque)
compresser des gaz...

...mais c'est aussi faire glisser les uns sur les autres les éléments du squelette de façon à aboutir à un meilleur arrangement des grains.

Figure A2.1 Image schématique du compactage [VALEUX, 1980]

L'essai Proctor, conçu initialement pour les sols fins, reste le seul essai couramment utilisé pour caractériser l'aptitude (la facilité ou la difficulté) au compactage des sols [ARQUIE, 1970]. Cet essai, bien qu'universellement employé, présente plusieurs inconvénients:

- le mode de compactage (dynamique) est peu représentatif du compactage sur chantier;
- l'essai ne renseigne pas sur le comportement du matériau en cours du compactage.

Selon Valeux (1980), l'effet du compactage engendré par un engin est produit soit par l'action de son poids statique, qui peut être transmis au matériau par effort vertical, par pétrissage ou par poinçonnement; soit par l'action dynamique, pouvant être transmise au matériau par vibration ou par chocs; soit par combinaison des deux (Figure A2.2).

Il y a différents engins de compaction:

- les compacteurs statiques lisses;
- les compacteurs statiques à pieds dameurs;
- les compacteurs à pneus.

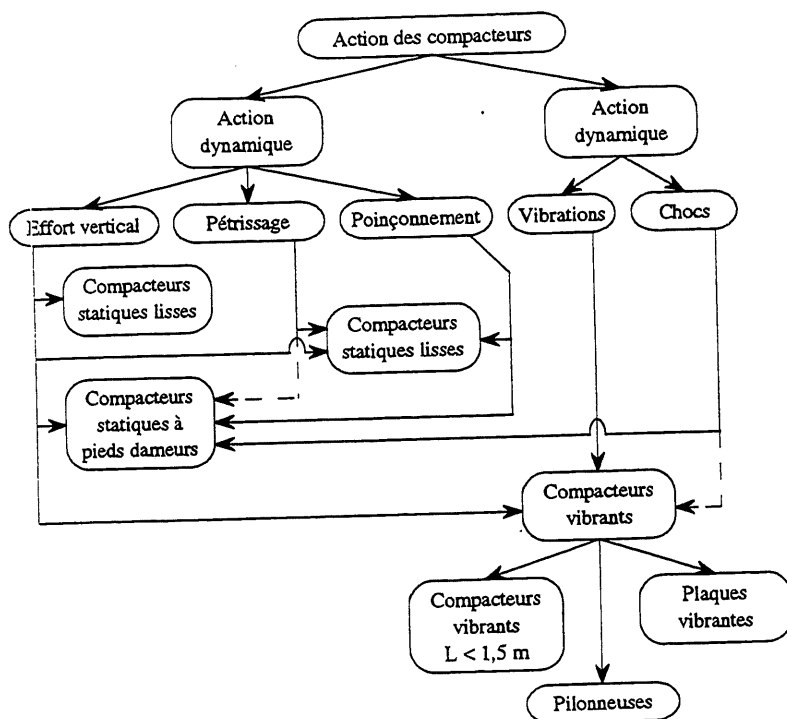


Figure A2.2 Schéma de l'action des compacteurs [VALEUX, 1980]

Plusieurs paramètres influencent les résultats du compactage in situ. Certains de ces paramètres sont liés au matériau compacté, d'autres sont liés aux techniques de compactage.

ANNEXE 3

CHIMIE ET MINÉRALOGIE DES CKD

ANNEXE 3 Chimie et minéralogie des CKD

Tableau A3.1 Analyse chimique des CKD

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Total	CL	fCaO
Alpena 5	14,45	3,47	0,17	0,06	1,82	52,60	1,46	0,15	2,60	17,00	8,92	100,70	0,32	22,03
Alpena 5	14,54	3,97	0,19	0,05	1,83	50,99	1,22	0,17	2,03	8,75	17,05	100,79	0,28	16,83
Alpena 5	14,22	3,98	0,19	0,07	1,77	45,33	1,14	0,33	3,54	14,78	12,58	98,02		14,26
Alpena 5	14,11	3,95	0,19	0,07	1,74	44,60	1,12	0,31	3,53	14,73	12,48	96,92		14,16
Alpena 5	14,04	4,05	0,19	0,07	1,73	44,00	1,08	0,30	0,84	14,51	13,02	96,95		13,46
Alpena 5	14,17	4,07	0,19	0,07	1,77	44,64	1,10	0,33	3,72	14,53	13,18	97,86		13,59
Alpena 5	14,19	4,10	0,19	0,07	1,76	44,61	1,09	0,32	4,03	14,58	13,03	98,08		12,99
Alpena 5	14,19	4,08	0,19	0,07	1,77	44,88	1,10	0,31	4,02	14,52	13,24	98,46		13,34
Alpena 5	14,18	4,09	0,19	0,07	1,74	44,39	1,10	0,35	4,02	14,66	12,71	97,59		13,59
Alpena 5	14,14	4,08	0,19	0,07	1,75	44,68	1,09	0,29	4,13	14,62	12,57	97,70		13,75
Moyenne	14,30	3,78	0,18	0,07	1,79	44,64	1,28	0,22	3,37	15,81	9,75	99,20	0,30	17,89
Écart-type	0,22	0,43	0,01	0,01	0,05	5,69	0,26	0,10	1,08	1,08	4,00	2,12	0,05	6,85
Alpena 6	14,59	3,51	0,25	0,08	1,76	48,20	1,38	0,24	3,94	15,50	10,28	96,66	0,98	13,87
Alpena 6	15,08	3,54	0,35	0,05	1,88	52,10	1,48	0,26	3,93	14,48	8,11	101,26	0,58	22,10
Alpena 6	13,68	4,06	0,64	0,07	1,71	44,23	1,06	0,37	5,55	13,83	12,05	97,34		15,27
Alpena 6	13,80	4,06	0,59	0,07	1,74	45,95	1,09	0,35	5,09	13,85	11,98	98,66		15,52
Alpena 6	13,72	4,01	0,56	0,07	1,72	45,24	1,07	0,33	5,03	14,00	12,05	97,89		15,23
Alpena 6	13,68	4,04	0,61	0,07	1,71	44,85	1,06	0,29	5,31	13,98	12,51	98,25		14,51
Moyenne	14,11	3,78	0,43	0,07	1,74	46,53	1,22	0,34	4,63	14,74	11,40	98,96	0,78	14,09
Écart-type	0,01	0,37	0,26	0,01	0,04	2,37	0,23	0,07	0,97	1,07	1,58	1,00	0,28	0,59
Bath	13,98	3,97	0,17	0,09	1,38	38,29	1,47	0,40	4,54	4,12	32,63	101,04	0,92	0,25
Bath	15,30	3,54	0,19	0,06	1,34	39,88	1,25	0,14	2,89	2,77	33,41	100,86	0,79	0,01
Bath	15,02	3,52	0,19	0,06	1,32	39,66	1,18	0,25	3,41	2,78	33,26	100,76		0,45
Bath	15,21	3,54	0,18	0,06	1,32	39,92	1,20	0,27	3,10	2,38	33,67	100,94		0,11
Bath	15,17	3,54	0,18	0,06	1,31	39,68	1,18	0,27	3,06	2,36	33,47	100,38		0,12
Moyenne	14,58	3,76	0,18	0,08	1,35	38,99	1,33	0,34	3,80	3,24	33,05	100,71	0,92	0,19
Écart-type	0,84	0,30	0,01	0,02	0,05	0,98	0,20	0,09	1,05	1,24	0,59	0,47	0,09	0,09
Brookfield	13,20	4,20	0,02	0,05	1,40	39,60	0,90	0,10	2,80	6,30	27,50			
Brookfield	14,64	3,84	0,19	0,02	1,44	45,99	0,94	0,09	2,04	4,10	27,04	100,33	0,26	3,72
Brookfield	14,74	3,95	0,19	0,04	1,50	44,38	1,00	0,11	2,27	3,85	28,01	100,14	0,43	2,40
Brookfield	14,56	3,87	0,19	0,03	1,46	45,43	0,98	0,16	2,55	4,32	27,20	100,75	0,59	2,52
Brookfield	14,60	3,93	0,19	0,04	1,48	44,15	0,94	0,18	2,30	3,26	28,27	99,44		2,55
Brookfield	14,64	3,94	0,19	0,04	1,51	44,38	0,94	0,09	2,28	3,22	28,14	99,47		2,48
Brookfield	14,68	3,93	0,19	0,04	1,51	44,73	0,95	0,16	2,32	3,31	28,19	100,11		2,54
Brookfield	14,65	3,93	0,19	0,04	1,51	44,56	0,94	0,14	2,27	3,18	28,14	99,65		2,47
Moyenne	13,93	4,07	0,11	0,05	1,46	42,08	0,92	0,12	2,54	4,74	27,82	99,65	0,42	2,47
Écart-type	1,03	0,19	0,12	0,01	0,08	3,51	0,03	0,03	0,37	2,21	0,45	0,48	0,23	0,88

Tableau A3.1 Analyse chimique des CKD (suite)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Total	CL	fCaO
Exshaw 4	13,20	2,30			1,90	47,20	2,20	0,20	2,90	5,60	24,70		0,20	10,40
Exshaw 4	13,19	2,31	0,12	0,03	1,87	47,23	2,24	0,22	2,94	5,60	24,73	100,48	0,18	10,35
Exshaw 4	12,78	2,39	0,12	0,05	1,89	44,78	3,21	0,18	1,94	2,81	29,37	99,57	0,32	6,22
Exshaw 4	12,89	2,48	0,12	0,05	1,86	45,74	3,22	0,16	1,81	2,85	28,31	99,54	0,29	7,52
Exshaw 4	12,62	2,45	0,12	0,04	1,83	45,09	3,15	0,17	1,96	2,78	29,73	99,99	0,33	5,92
Exshaw 4	12,83	2,46	0,12	0,05	1,87	45,79	3,20	0,17	1,76	2,83	28,52	99,65	0,27	7,45
Moyenne	13,02	2,38	0,12	0,05	1,89	46,50	2,70	0,19	2,33	4,22	26,61	99,65	0,24	8,93
Écart-type	0,26	0,11	0,00	0,01	0,02	1,00	0,71	0,02	0,81	1,96	2,70	0,59	0,05	2,09
Exshaw 5	12,38	2,16	0,11	0,03	1,81	52,15	2,70	0,49	11,25	10,69	9,17	102,94	0,83	29,64
Exshaw 5	15,76	3,44	0,15	0,05	1,68	57,26	3,95	0,19	4,26	6,54	6,59	99,93	0,44	39,13
Exshaw 5	15,99	3,48	0,15	0,05	1,70	56,62	3,97	0,19	4,14	6,44	6,59	99,38	0,38	39,79
Exshaw 5	16,74	3,65	0,15	0,06	1,80	56,64	3,97	0,22	4,07	6,53	6,18	100,07	0,27	40,17
Exshaw 5	15,80	3,50	0,15	0,05	1,67	56,72	3,93	0,22	4,00	6,44	6,69	99,23	0,38	38,20
Exshaw 5	14,35	2,91	0,13	0,04	1,55	47,72	3,01	0,20	4,78	3,86	21,30	99,91	0,71	18,67
Exshaw 5	12,87	2,77	0,12	0,03	1,40	57,48	3,91	0,51	10,59	9,00	2,47	101,15	1,08	35,62
Exshaw 5	13,92	2,87	0,12	0,04	1,51	47,10	3,00	0,28	5,28	4,00	22,02	100,19		18,77
Exshaw 5	14,31	2,90	0,13	0,04	1,51	47,21	2,94	0,22	5,20	4,04	21,51	100,06		18,79
Exshaw 5	13,84	2,87	0,12	0,04	1,50	47,08	2,96	0,27	5,21	3,99	22,10	100,03		18,63
Exshaw 5	14,16	2,90	0,12	0,04	1,53	47,11	2,91	0,28	5,48	4,19	21,53	100,03		18,75
Exshaw 5	14,10	2,90	0,13	0,04	1,51	47,00	2,91	0,25	5,27	4,21	21,44	99,81		18,99
Exshaw 5	14,20	2,90	0,12	0,04	1,52	46,78	2,91	0,27	5,26	4,04	21,68	99,77		18,78
Exshaw 5	13,85	2,88	0,12	0,04	1,52	47,28	2,97	0,28	5,16	3,99	22,01	100,15		18,61
Moyenne	13,12	2,52	0,12	0,04	1,67	49,72	2,84	0,39	8,21	7,34	15,59	101,55	0,83	24,13
Écart-type	1,04	0,51	0,01	0,01	0,21	3,44	0,19	0,15	4,31	4,74	9,08	1,97	0,18	7,80
Richmond	13,48	3,99	0,20	0,03	2,47	54,34	0,59	0,20	1,10	2,67	20,87	99,94	0,12	16,98
Richmond	1308	3,44	0,18	0,04	1,55	47,59	0,55	0,66	3,57	9,36	18,20	98,32		14,82
Richmond	12,94	3,43	0,17	0,04	1,54	46,96	0,55	0,66	3,48	9,37	18,37	97,61		15,03
Richmond	13,21	3,53	0,18	0,04	1,60	48,69	0,59	0,70	3,10	9,62	17,63	99,00	0,32	14,82
Moyenne	13,35	3,76	0,19	0,04	2,04	51,52	0,59	0,45	2,10	6,15	19,25	99,47	0,22	15,90
Écart-type	0,19	0,33	0,01	0,01	0,62	4,00	0,00	0,35	1,41	4,91	2,29	0,66	0,14	1,53

Ces échantillons ont été prélevés entre 1994 et 1996

Prélèvement durant trois ans des poussières de four de cimenterie d'Alpena.
Représentation par diagramme ternaire.

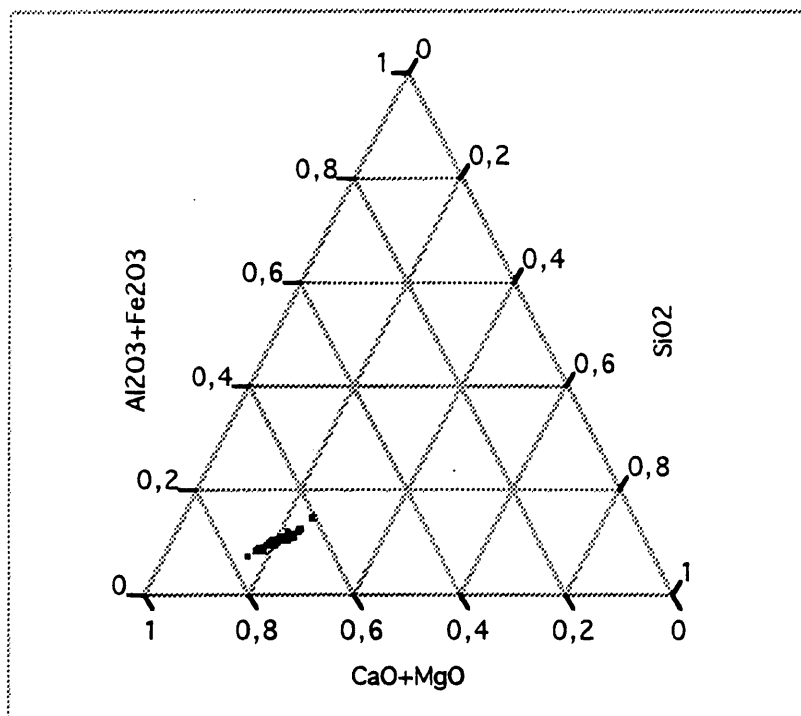


Figure A3.1 Diagramme ternaire d'Alpena (SiO_2)-($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$)-($\text{CaO}+\text{MgO}$)

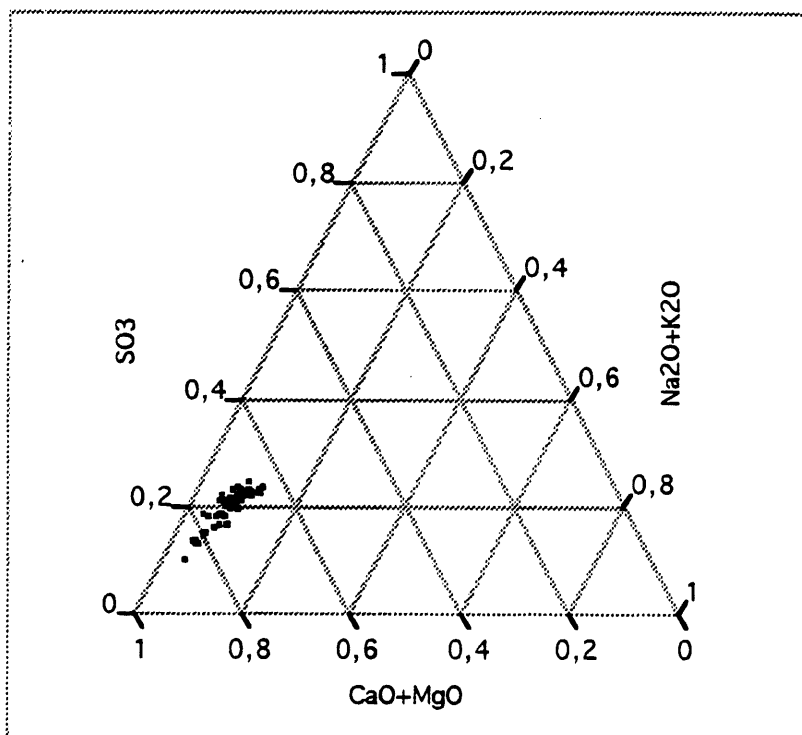


Figure A3.2 Diagramme ternaire d'Alpena ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)-(SO_3)-($\text{CaO}+\text{MgO}$)

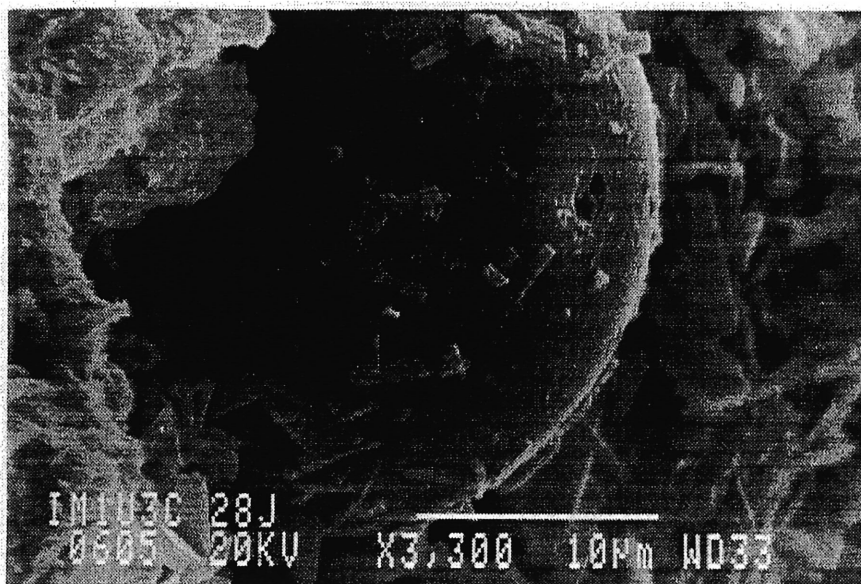


Figure A3.3 Cendre volante d'Edgewater autour de laquelle il y a début de formation de l'ettringite

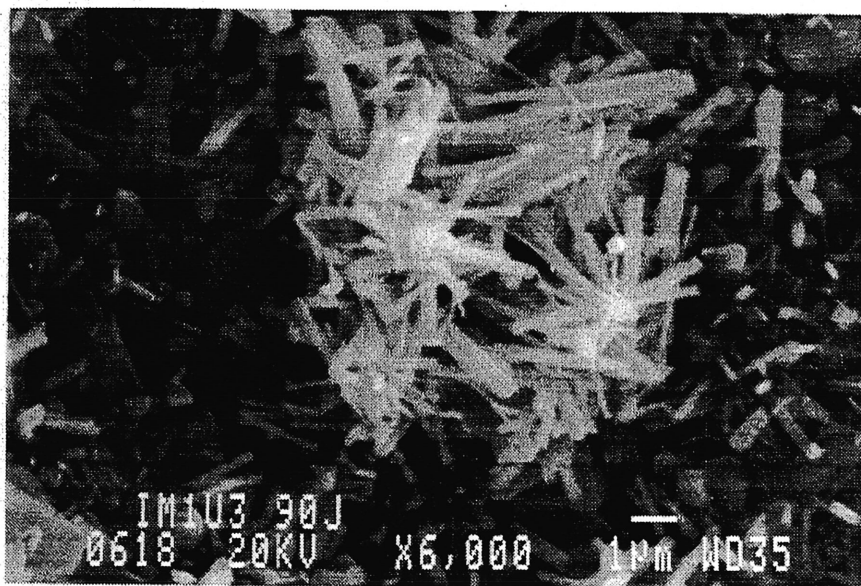


Figure A3.4 Ettringite cristallisée en aiguille

K5+ %CV 30MIN

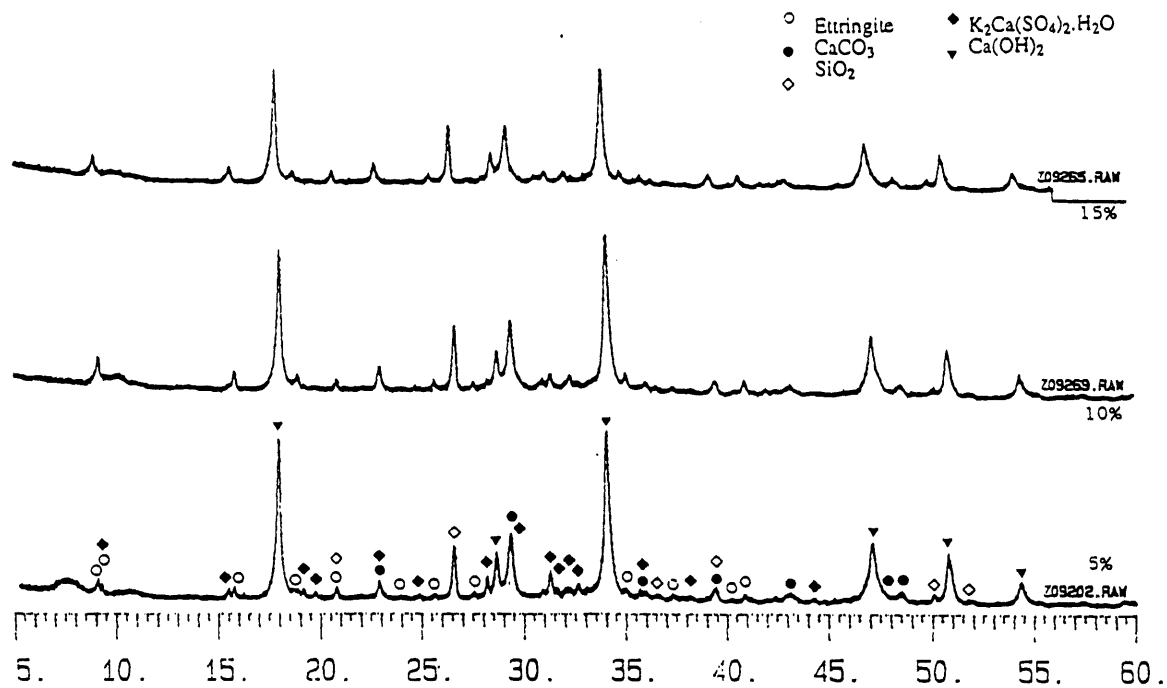


Figure A3.5 Spectres de diffraction X de K5+x%CV Exshaw après hydratation

K5+10%CV

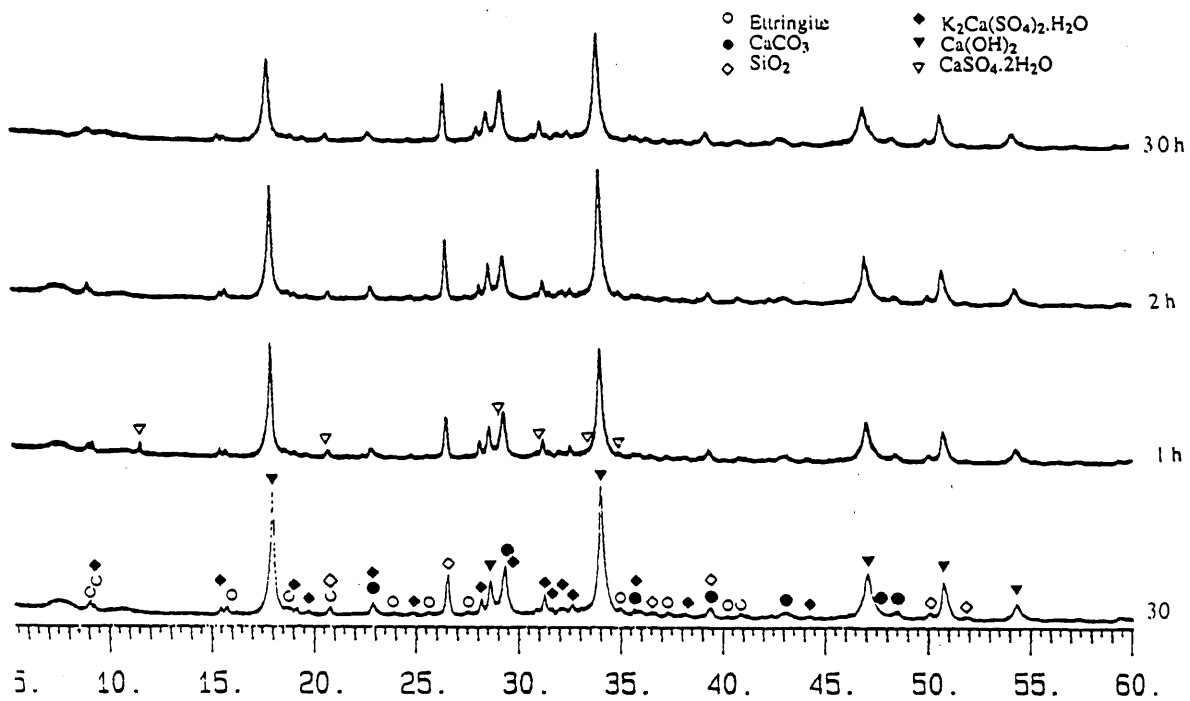


Figure A3.6 Spectres de diffraction X de K5+10%CV Exshaw après hydratation

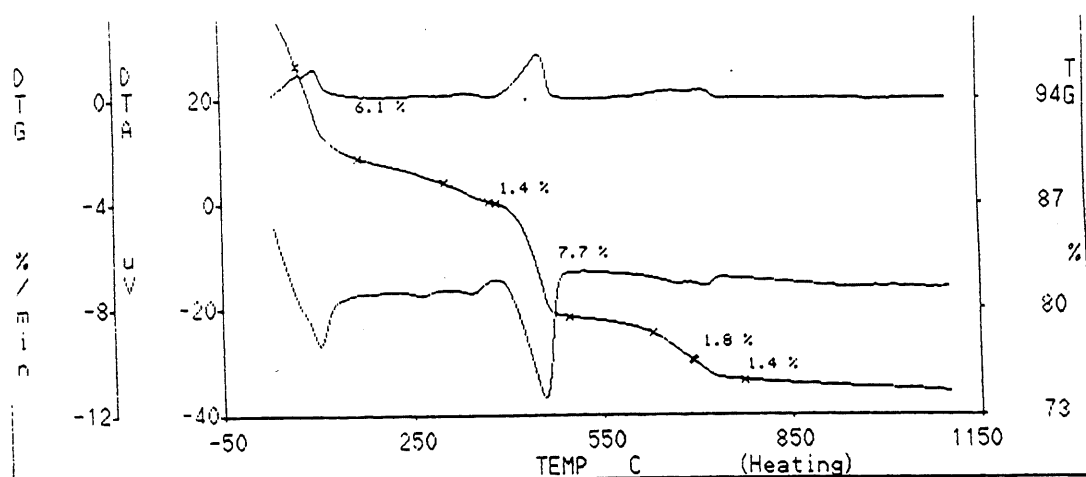


Figure A3.7 Analyse ATG-ATD pour K5+10%CV Exshaw après 30 minutes d'hydratation

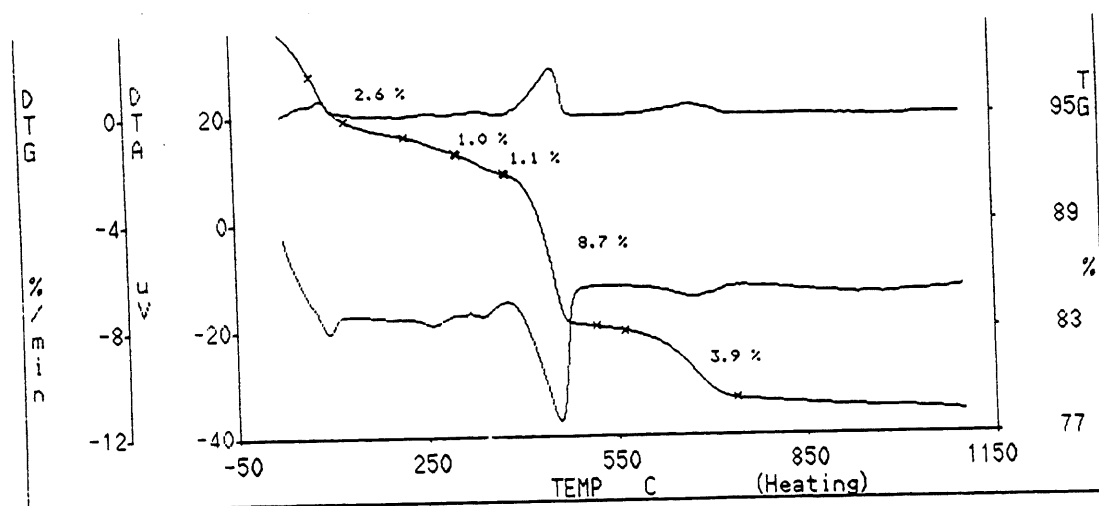


Figure A3.8 Analyse ATG-ATD pour K5+10%CV Exshaw après 1 heure d'hydratation

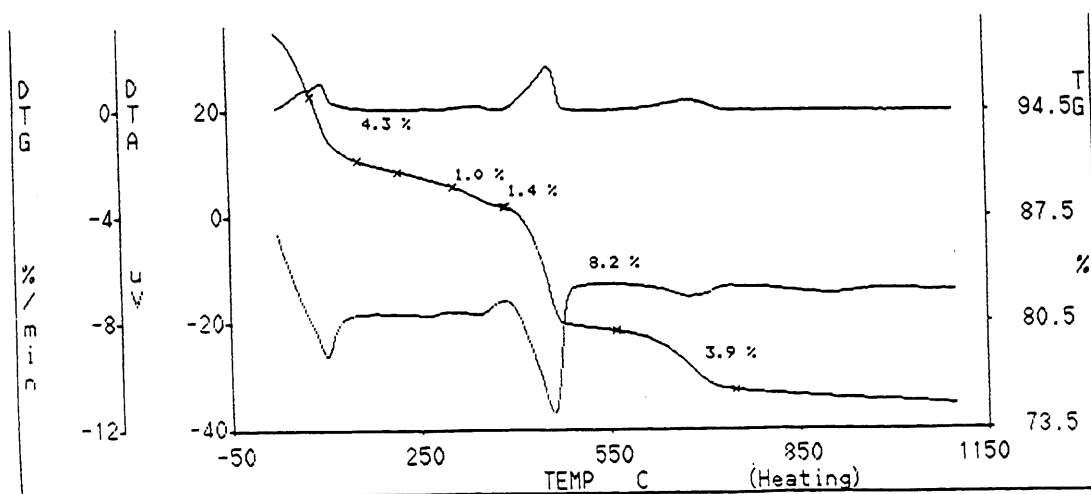


Figure A3.9 Analyse ATG-ATD pour K5+10%CV Exshaw après 2 heures d'hydratation

ANNEXE 4

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES: LABORATOIRE ET CHANTIER

ANNEXE 4 Résultats complémentaires: Laboratoire et chantier

Tableau A4.1 Coefficient de dilatation thermique

Identification : K5+10%FA+2%ociment

Age échantillon: 60 jours

Température (°C)	Voltages lus			
	éch 0	éch 1	éch 2	éch 3
23	-0.211			0.082
28	0.684			0.936
38	1.802			2.128
41	2.442			2.799
47	3.490			4.160

<i>Longueur de l'échantillon (mm)</i>	296.0			305.0
---------------------------------------	-------	--	--	-------

<i>Pente de la droite Volts vs Temp.</i>	0.1480			0.1614
--	--------	--	--	--------

<i>Facteurs de calibration des LVDT</i>	0.1259			0.1232
---	--------	--	--	--------

<i>Facteurs de calibration du montage</i>	0.00246			0.00259
---	---------	--	--	---------

<i>Coefficients de dilatation thermique</i>	6.40E-05			6.62E-05
---	----------	--	--	----------

CDT MOYEN (mm/mm/°C)

6.51E-05

Durabilité des mélanges au gel-dégel

Cet essai a été réalisé selon les recommandations de l'article 9.4 de la norme BNQ 2624-120, proche de la norme ASTM C 672-91. Le but de cet essai est de déterminer l'action des cycles gel-dégel en regard de la durabilité des matériaux testés au moyen de l'évaluation des pertes de masse des éprouvettes baignant dans une solution saline (solution de NaCl permettant d'accélérer les processus). Le cycle de gel et de dégel a une durée normale de 24 heures dont 16 ± 1 heures sont destinées à la congélation ($-15 \pm 3^{\circ}\text{C}$), les 8 ± 1 heures suivantes étant consacrées à la décongélation (5°C sans jamais dépasser 30°C).

Les contenants utilisés pour l'immersion des éprouvettes doivent être préfabriqués de matériaux non corrosifs et leurs dimensions doivent permettre l'immersion complète des éprouvettes dans la solution saline. Il faut s'assurer que le contour de l'éprouvette est recouvert d'au moins 2 mm de solution saline et que le rapport entre le volume de la solution saline et le volume de l'éprouvette est égal ou inférieur à 2. Le mode opératoire sommaire: préconditionnement des éprouvettes de 24 heures à l'air ambiant; le séchage à l'étuve pendant 24 heures; la mise en place de l'éprouvette dans le récipient d'eau saline; la saturation et le cycles de gel/dégel en commençant par une congélation. Après 10, 25 et 50 cycles, l'éprouvette est rincée dans une solution de NaCl à 3% pour enlever toutes les particules détachées, qui sont recueillies, lavées, filtrées (tamis à 80 mm), séchées et pesées à plusieurs reprises jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Le rapport de cette masse de résidu avec la masse initiale à l'état sec de l'éprouvette constitue la mesure de désagréation de l'échantillon. L'essai s'arrête après 50 cycles de gel/dégel sauf si la perte est supérieure à $3 \pm 0,1\%$ de la masse initiale à l'état sec.

Des éprouvettes de K5+10%CV+2%C, compactées à différents rapport E/M (36%, 42% et 45%, avant malaxage), mûris dans une chambre à air humide pendant 8 jours ont été confectionnées. Les résultats, présentés par la suite, ne sont pas encourageants car les éprouvettes ont commencé à se désagréger après le premier cycle de gel/dégel. Une grande porosité et surtout une faible cimentation (due au court temps de mûrissement) en sont sûrement la cause. Des essais

ont donc ensuite été entrepris sur des échantillons de K5+10%CV+2%C avec un rapport E/M de 37%, avant malaxage, mûris en chambre humide pendant plus d'un mois (35 jours). Les échantillons ne se sont totalement désagregés qu'après 7 cycles de gel/dégel. De plus, seulement après un cycle, une fissuration plus ou moins prononcée est apparue sur toutes les éprouvettes. La cause de cette fissuration est sûrement due à une trop grande porosité des échantillons. En effet, l'observation a montré un dégagement de bulles d'air lors de la saturation.

Pour confirmer ces résultats, on a réalisé des essais sur des échantillons de plus grande taille (essai permettant normalement de suivre l'écaillage superficiel de plaque carrée d'environ 200 mm de côté) et on n'a pas utilisé une solution saline.

Tableau A4.2 Perte en masse lors des cycles gel-dégel

Cycle	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	7 (%)	8 (%)	10 (%)	11 (%)	17 (%)	18 (%)	22 (%)
A	0,03	0,09	0,27	0,85	6,37	8,74	13,71	16,67	23,77	24,79	29,24
B	0,03	0,16	0,16	0,51	2,11	2,87	5,58	7,02	16,00	17,43	21,57
C	0,34			1,88	14,25	14,75	24,62	26,97	32,84	33,71	36,63
D	-2,37	-2,43	9,60	35,77							
E	-1,66	0,94	9,04	25,52							

NOTATION:

- A et B K5+10%CV+2%C
- C K5+10%CV
- D Alpena
- E Alpena+10%Pullium

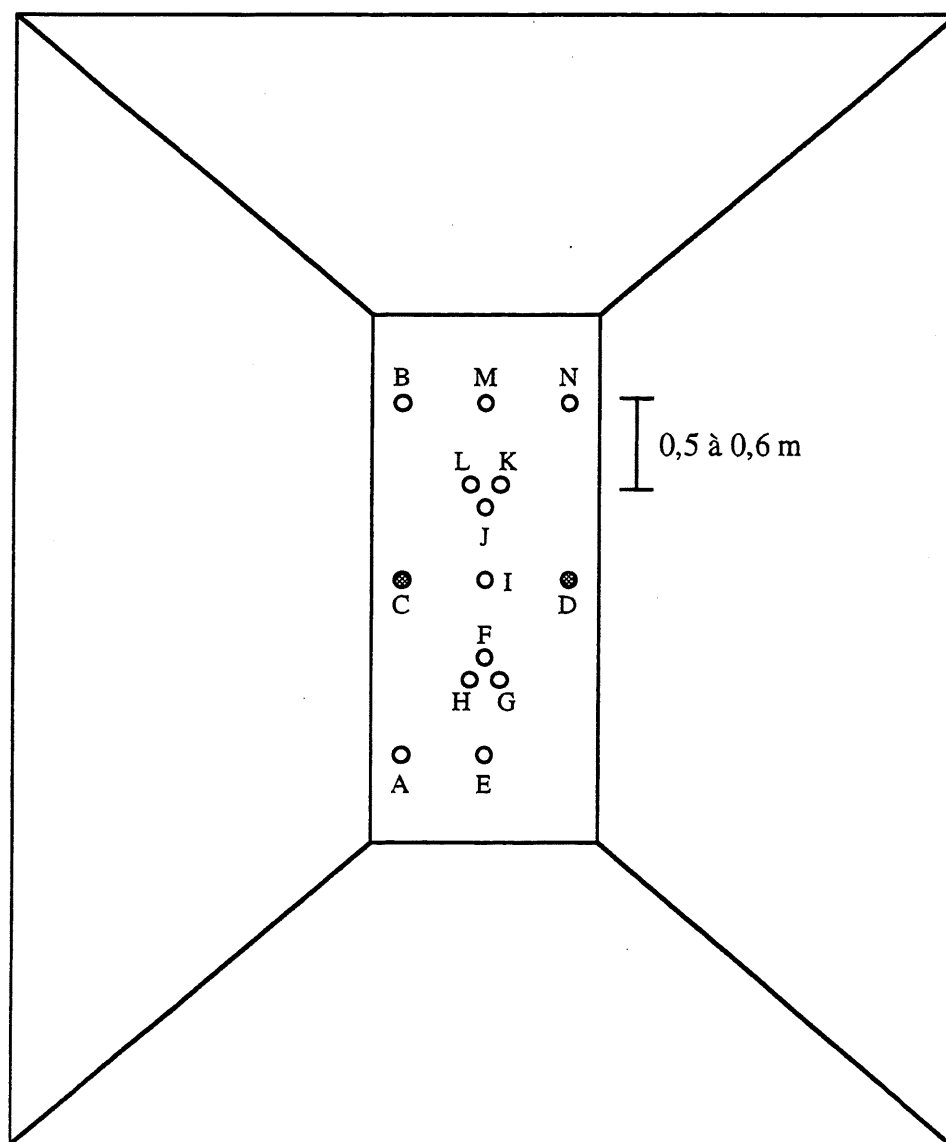


Figure A4.1 Localisation des forages de la digue 1: Exshaw5 + 10%CV

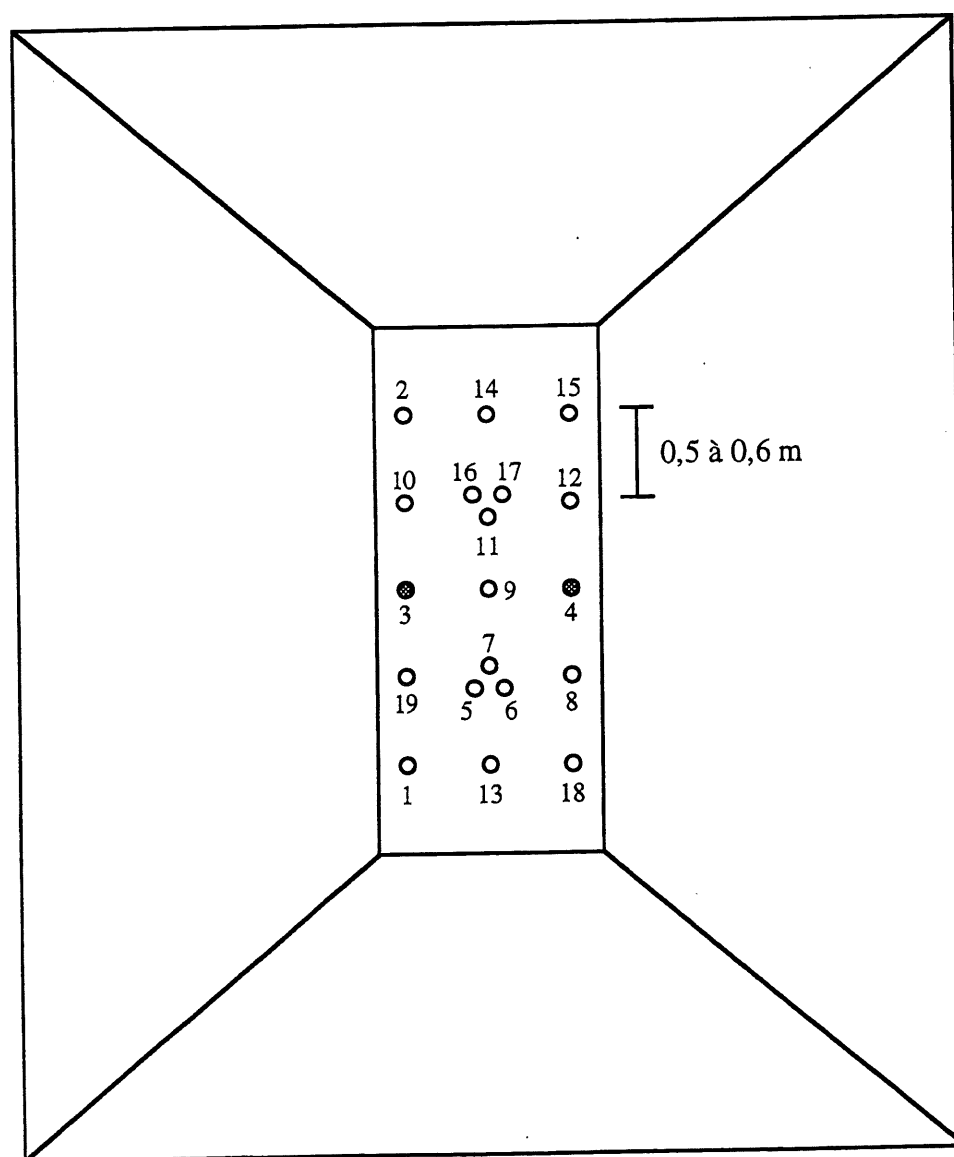


Figure A4.2 Localisation des forages de la digue 2: Exshaw5 + 10%CV + 2%ciment

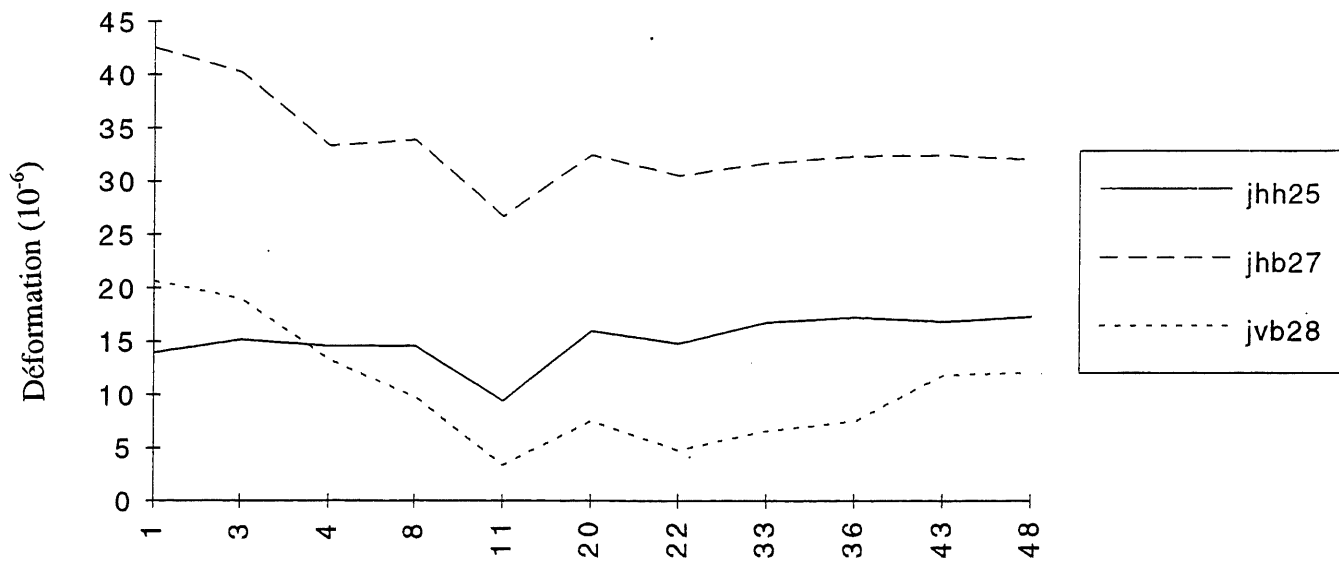


Figure A4.3 Digue 1: Exshaw5+10%CV Suivi des déformations

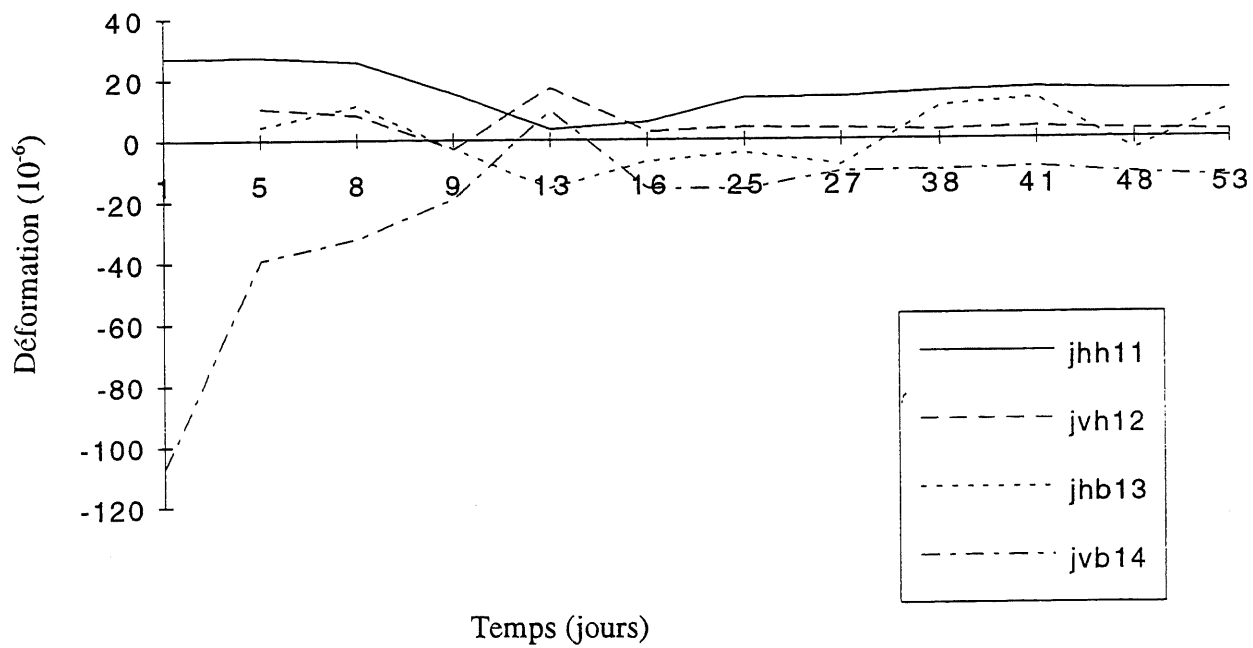


Figure A4.4 Digue 2: Exshaw5+10%CV+2%ciment Suivi des déformations

Les valeurs soniques par la méthode de "cross-hole":

- les forage 1, 2, 3 et 4 varient de 1500 m/s à 1800 m/s;
- les forage A, B, C et D varient de 900 m/s à 1200 m/s;
- les forage 6, 8 et 9 varient de 1900 m/s à 2300 m/s;
- les forage F, I et J varient de 450 m/s à 800 m/s.

Tableau A4.3 Caractéristiques physiques des échantillons prélevés sur les planches d'essais

Forage	Échantillon	Teneur en eau (%)	Teneur en eau saturée (%)	Degré de saturation (%)	Masse volumique humide (kg/m^3)	Perméabilité (cm/s)
1	D2P50	54,46	60,0	90,8	1160,4	$3,0 \times 10^{-8}$
I	D1P30	31,87	39,0	81,7	1015,0	$5,0 \times 10^{-6}$
K	D1P30	33,54	41,0	81,8	1020,0	$0,2 \times 10^{-7}$
7	D2P10	41,65	46,4	89,8	1217,1	$2,0 \times 10^{-7}$
7	D2P30	1,25	40,2	77,7	1076,0	$1,3 \times 10^{-7}$
7	D2P50	48,37	56,0	86,4	1085,1	$1,0 \times 10^{-7}$
13	D2P10	40,52	48,1	84,2	1220,0	$1,5 \times 10^{-7}$
13	D2P30	32,35	41,3	78,3	1115,3	$3,0 \times 10^{-7}$
13	D2P50	42,87	57,0	75,2	1302,5	$1,2 \times 10^{-8}$
14	D2P10	40,25	44,9	89,6	587,0	$2,0 \times 10^{-7}$
14	D2P30	29,80	38,8	76,9	930,0	$0,2 \times 10^{-7}$
14	D2P50	49,34	55,0	89,7	1004,0	$1,3 \times 10^{-8}$
14	D2P60	50,27	53,0	94,9	1122,0	$1,0 \times 10^{-8}$

Tableau A4.4 Exemple de résistance à la compression simple et de vitesse longitudinale des échantillons prélevés sur la digue 2

Échantillon	F16D2P30	F16D2P60	F12D2P30	F12D2P60	F10D2P10	F9D2P30
Résistance à la compression C_0 (MPa)	3,0	4,2	2,7	3,8	1,7	3,5
Vitesse longitudinale (m/s)	1800	2148	1925	1900	1850	2100

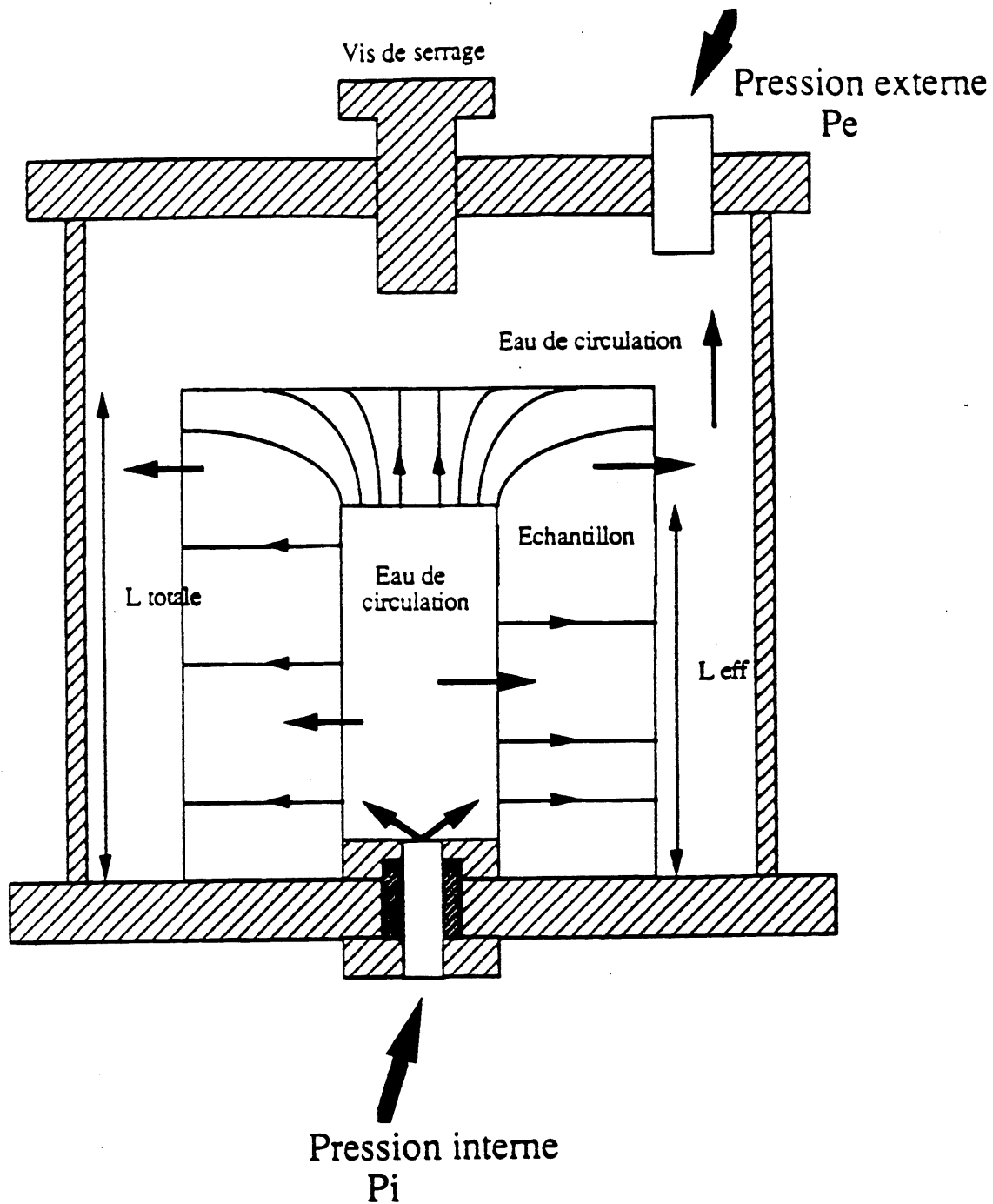


Figure A4.5 Principe d'un essai de circulation sur un échantillon de barrière en poussières de four de cimenterie

La perméabilité a été effectuée selon la norme ASTM D5084-90. Une pression de confinement de 100 kPa et une différence de pression de 17 kPa ont été utilisés. La perméabilité est donnée par la formule suivant:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta P \cdot t} \quad (A4.1)$$

où K: coefficient de perméabilité (m/s);
 Q: volume (m³);
 L: longueur de l'échantillon (m);
 A: surface de l'échantillon perpendiculaire à l'écoulement (m²);
 ΔP: différentiel de pression (m d'eau);
 t: temps (s).

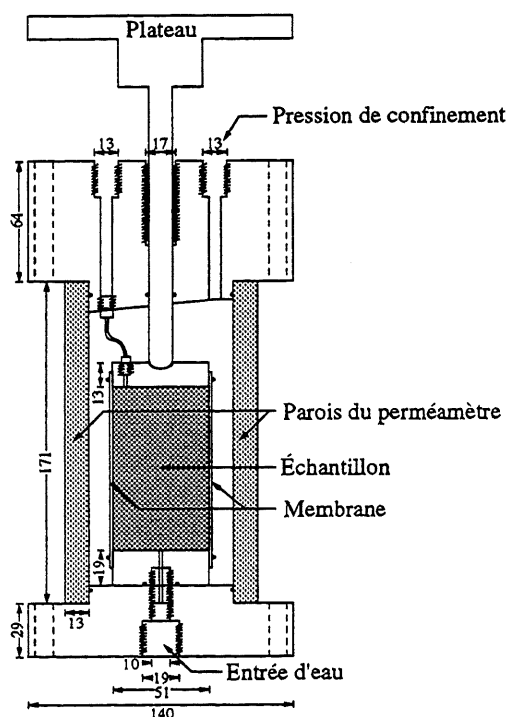


Figure A4.6 Perméamètre triaxial

ANNEXE 5

PHOTOS DE CHANTIER

- * Planches d'essais Exshaw => à l'Université de Sherbrooke
 - * Planches d'essais Alpena => à Alpena au Michigan, U.S.A.
-

ANNEXE 5 Photos de chantier



Figure A5.1 Malaxage des matériaux avec une bêcheuse



Figure A5.2 Pose des drains de 4 pouces à géotextile



Figure A5.3 Mise en place de la couche drainante: sable compacté

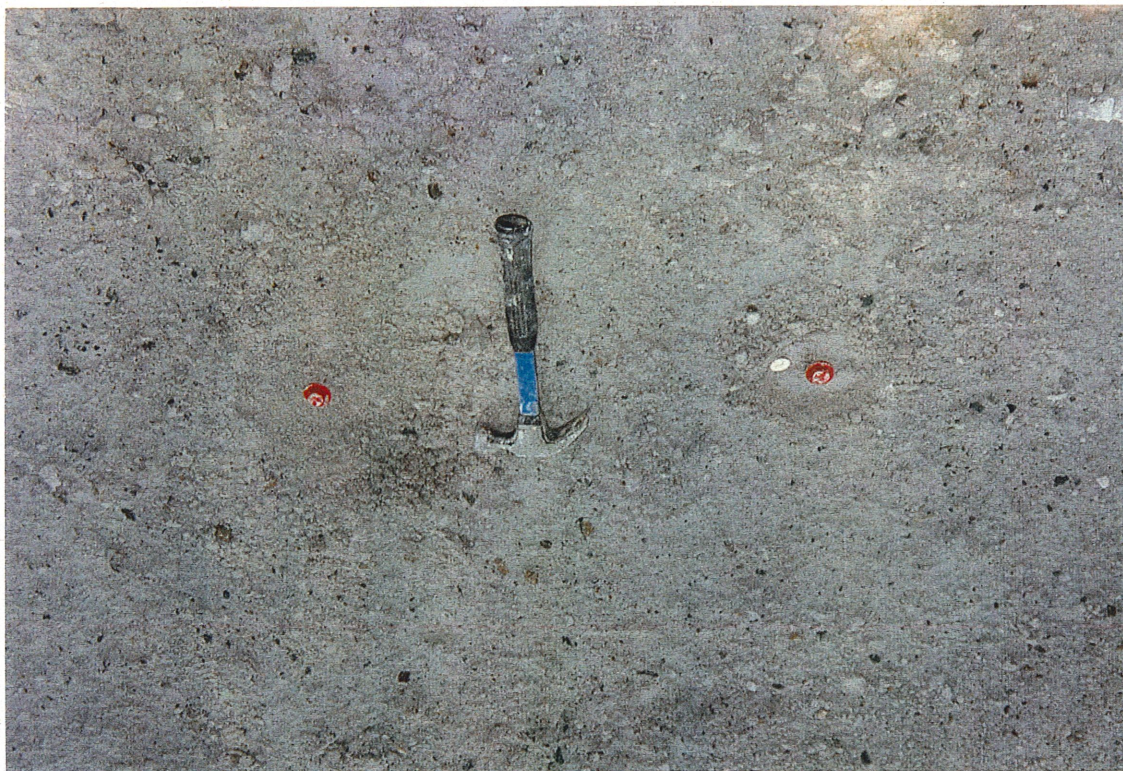


Figure A5.4 Repère de nivellement



Figure A5.5 Mesures topographiques



Figure A5.6 Vue Générale des bancs d'essais d'exshaw
1: Exshaw5+10%CV Exshaw
2: Exshaw5+10%CV Exshaw+2%Ciment sans compactage
3: Exshaw5+10%CV Exshaw+2%Ciment



Figure A5.7 Malaxeur programmable



Figure A5.8 Décapeuse élévatrice



Figure A5.9 Vue de la planche d'essai 1 (KG5+30% d'eau) réalisation sans attente entre le malaxage et le compactage



Figure A5.10 Vue de la planche d'essai 3 (KG6+10%CV Edgewater+30% d'eau) réalisation avec attente de 30 minutes entre le malaxage et le compactage



Figure A5.11 Prélèvement des échantillons sur les planches d'essais

BIBLIOGRAPHIE

- ARQUIE, G. (1970) *Le compactage: routes et pistes*, Paris, Éditions Eyrolles, 314 pages.
- ASTM (1995) Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Philadelphia, PA, U.S.A.
- AUBERTIN, M., BUISSIÈRE, B., CHAPUIS, R.R., AACHIB, M. (1993). *Propriétés des résidus miniers utilisés comme matériau de recouvrement pour limiter le DMA*. Geoconfine 93. C.R. Sympo. Int. Géologie et confinement des déchets toxiques. Arnould, Barrès and Côme, Balkema éd., p.299-308.
- BAGHDADI, Z.A. et RAHMAN, M.A. (1990) *The Potentiel of Cement Kiln Dust for the Stabilization of Dune Sand in Highway Construction*, Building and Environment, Vol. 25, No 4, p. 285-289.
- BAGHDADI, Z.A., FATANI, M.N., SABBAN, N.A. (1995) *Soil modification by cement kiln dust*, Journal Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No 4, p. 218-222.
- BALLIVY, G. (1987) *Perméabilité et résistance au lessivage des poussières de four de cimenterie d'Alpena*, Ciment Canada Lafarge Ltée, Rapport GR-87-08-30, Université de Sherbooke, 127 pages.
- BALLIVY, G., BELLALOU, A., RHOUZLANE, S. (1994) *Consolidation et stabilisation des poussières de four de cimenterie: État de la question*, rapport n° GR-94-04-30, Université de Sherbrooke, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, 8 pages.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., AITCIN, P.C., GRAY, M.N., ONOFREI, M., (1988), *Efficacité des injections de coulis de ciment dans les massifs microffissurés*, 41^{ème} conférence canadienne de géotechnique, Waterloo Ontario (canada), p. 40-48.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., COLIN, J.C., AITCIN, P.C. (1990) *Étude sur éprouvettes de la perméabilité de roches injectées d'un coulis de ciment*, Proceedings of rock at great depth, Pau, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 1337-1345.
- BALLIVY, G., ROUIS, J., BRETON, D. (1992) *Use of cement residuel Kiln Dust as Landfill liner*, Cement Industry Solutions to Waste Management, C.P.C.A Conference, Calgary, p. 99-105.
- BARONE, F.S, ROWE, K.R., QUIGLEY, R.M. (1990) *Laboratory determination of chloride diffusion coefficient in an intact shale*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No 2, p. 177-184.
- BAUDRACCO, J. (1985) *Étude expérimentale de l'altération des roches par percolation*, Actes du cinquième congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre, Lausanne (Suisse), vol.1, p. 177-184.
- BEAR, J. (1979) *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill Éd., 567 pages.

- BENJAMIN, W., KRAMER, H., G.W. (1982) *Characterization of U.S. cement kiln dust*, Bureau of mines, U.S. department of interior, 22 pages.
- BENZA AZOUA, M. (1997) *Caractéristiques des liants utilisés dans les remblais miniers cimentés*, Université du Québec, Rouyn-Noranda, Volume 1, p. 31-44.
- BHATTY, M.S.Y. (1985) *Cement kiln dust blends evaluated*, Rock products, n. 65, p. 47-52.
- BOUCHARD, S. (1991) *Stabilité des ouvrages miniers*, Odile Germain, Québec, 432 pages.
- BOWDERS, J.J.Jr, USMEN, M.A., GIDLEY, J.S. (1987) *Use of geomembranes in deep valley landfills*, Proc. of geotechnical practice for waste disposal, An Arbor, USA, p. 320-330.
- BRADSHAW, A.D., CHADWICK, M.J. (1980) *The restoration of land*, Berkeley Los Angeles, USA, University of California Press, 317 pages.
- BROWN, L.S. (1970) *Discussion on mechanism of sea water attack on cement pastes*, A.C.I. Journal, Vol. 67, No 8, p. 646-648.
- BRUNAUER, S., EMMETT, P.H., TELLER, E. (1938) J. Am. Chem. Soc. Vol 60., p. 309.
- BUCCHI, G.C. (1981) "Features on the role of minor compounds in cement clinker - Part II", *World cement technology*, July, p. 67.
- BYE, G.C. (1983) "Portland Cement: Composition, production and properties", Pergamon Press Ltd, Oxford.
- CALLEJA, J. (1980) "Durability", 7e Congrès International de la chimie des ciments, vol. 1, Paris, p. VII.2/1-VII.2/48.
- CASAGRANDE, L. (1952) *Electro-osmotic stabilization of soils*, Boston Society of Civil Engineers, Contrib. Soils Mechanic, p. 1941-1953.
- CHAPUIS, R. P. (1990) *Revêtements étanches pour le bassin des traitements des eaux*. Comptes rendus, Colloque Géotechnique et Environnement, Centre Jacques Cartier, p. 89-94.
- CHATTERJEE, A.K. (1983) *Role of volatiles in cement manufacture in advances in cement technology*, S.N. Goosh, Ed., Pergamon Press Ltd, Oxford, p. 715-726.
- CHATTERJEE, S., JEFFREY, J.W. (1963) Journal of american ceramic society, n. 46, p. 179-191.
- CLASTRES, P., MURAT, M., BACHIORRINI, A. (1984) *Hydratation des ciments expansifs. Corrélation entre l'expansion et la formation des hydrates*. Cement and concrete research, vol.14, p. 199-206.
- COHEN, M.D. (1982) *Microstructural analysis of ettringite formation: scanning electron microscope*, Proceeding of 4th international conference on cement microscopy, Las Vegas (U.S.A.), p. 204-224.

- COLIN, J.C. (1990) *Conception et validation d'un système de perméabilité à température et pression variables*, Sherbrooke, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 110 pages.
- COLIN, J.C., BALLIVY, G. (1991) *Technique expérimentale pour l'étude des barrières rocheuses en laboratoire*, Compte-rendus de la 1^{re} Conférence canadienne de géotechnique environnementale, Éditeurs Chapuis P et Aubertin M, Québec, Canada, p. 301-306.
- COLLINS, R.J. et EMERY, J.J. (1983) "*Kiln Dust - Fly Ash Systems for Highway Bases and Subbases*", Report FHWA/RD-82/167, USDOE et USDOT, Washington, 23 pages.
- COUTURE, C. (1994) *Efficacité comparative de l'électrocinétique et d'un simple lessivage pour le traitement de sols contaminés au plomb*, Mémoire de maîtrise, département génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 204 pages.
- CPCA (Association Canadienne du Ciment Portland) (1984) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, p. 12-15.
- CPCA (Association Canadienne du Ciment Portland) (1989) *La récupération énergétique: la solution des fours à ciment*, 21 pages.
- CPCA (Association Canadienne du Ciment Portland) (1991) *The cement industry's contribution to Canada's green plan*, 3 pages.
- DANIEL, D. E. (1987) *Waste disposal and underground storage*. Ground Engineer's Reference Book, Butterworths, p. 115-127.
- DANIEL, D.E. (1984) *Predicting hydraulic conductivity of clay liner*. ASCE journal of geotechnical engineering, vol.111 (8), p. 957-970.
- DANIEL, D.E. ANDERSON, D.C. BOYNTON, S.S. (1985) "Fixed-wall versus flexible-wall permeameters hydraulic barriers in soil and rock", ASTM Special Technical Publication, vol. 874, p. 107-126.
- DANIEL, D.E., KOERNER, R.M. (1995) *Waste containment facilities* ASCE Press. American society of civil Engineers. p.349.
- DAY, S.R., DANIEL, D.E. (1985a) "Hydraulic conductivity of the two prototype liners", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 111, no 8, p. 957-969.
- DAY, S.R., DANIEL, D.E. (1985b) "Field permeability test for clay liners, in hydraulic barriers in soil and rock", ASTM Special Technical Publication, vol. 874, p. 276-288.
- DOUGLAS, L.A, RANCY, J.H, SHREIBER, R.J, YONLEY, C. [1993] *Detailed illustration of contingent management practices for cement Kiln dust*, Research and development Bulletin SP115T Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA, 15 pages.
- DRON, R., BRIVOT, F. (1989) *Le gonflement ettringitique*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, n. 169, p. 25-32.

- DROUIN, C. (1989) *L'environnement*. Rapport du directeur général, rapport annuel 1988 - 1989, Association minière du Québec, 15 pages.
- DUCHESNE, J. (1993) *Le rôle des ajouts minéraux face aux réactions alcalis-granulats dans le béton: mécanisme de réaction, performance et essais d'évaluation de la performance*, Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada, 237 pages.
- DUCHESNE, J., BÉRUBÉ, M.A. (1992) *Relationships between portlandite depletion, available alkalis and expansion of concrete made with mineral admixture*, Proceeding of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Londres, G.B., The Concrete Society, p 287-297.
- ELSBURY, B.R., DANIEL, D.E., STRADERS, G.A. et ANDERSON, D.C. (1990) Lessons learned from compacted clay liners. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, p. 1641-1660.
- ELWEFATI, A.M.; ALBADEN, A.S.; ABUSHWERE, M.A.; ABUDHER, J.N [1990] *Cement kiln dust, as a partial replacement for portland cement in concrete*. 15th Conference on our world in concrete&structure. 23-24 August, Singapoore, p. 14-21.
- EPA (1993) *Current managment practices for CKD cement kiln dust*, Report to congress on cement kiln dust, Environmental protection agency office of solid waste, p. 401-420.
- EPA (1993) *Toxicity characteristic leaching procedure*, EPA regulations for identifying hazardous waste, The bureau of national affairs, Inc., Part 261.
- FOLKES, D.J. (1982) *Control of Contaminant by the use of liners*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19, p. 320-344.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater*, New Jersey, Prentice-Hall, 604 pages.
- GAGNÉ, R. (1992) *La durabilité au gel des bétons à hautes performances*, Thèse de doctorat, Université Laval, Département de génie civil, Québec, Canada, 433 pages.
- GLASSER, F.P. (1992) *Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction - The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R.N. Swanny, University of Sheffield, ISBN 0-216-92691-2, 336 pages.
- GRIPPON, J. (1995) *Évaluation de paramètres mécaniques, thermiques, hydrauliques et environnementaux des poussières de four de cimenterie d'EXSHAW en Alberta*. Projet de fin de stage n.GR.95-09-01, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Université de sherbrooke. 94 pages.
- GROUPE GÉOTECHNIQUE DE MONTRÉAL (GGM) (1987) *Séminaire sur les barrières géologiques pour le contrôle de la contamination des eaux aux sites d'enfouissement*. Conseil national de recherche Canada, Mémoire Technique No 143F, CNRC28546F, 30 pages.
- HAMPTON, J.H.D., THOMAS, M.D.A. (1993) "Modelling relationships between permeability and cement paste pore microstructures", Cement and Concrete Research, vol. 23, no 6, p. 1317-1330.

- HARLAN, R.L. (1973) *Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soils*, Water Resources Research, No 9, p. 1314-1323.
- HEARN, N., HOOTON, D., MILLS, R.H. (1993) "Pore structure and permeability, significance of tests and properties of concrete and concrete making materials", ASTM Special Technical Publication 169B.
- HERMAN, J. C., Elsbury, B. R. (1987) *Influential factors in soil liner construction for waste disposal facilities*. Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, p. 522-536.
- HOBBS, D.W. (1989) *Effect of mineral and chemical admixtures on alkali-aggregate reaction*, Proceeding of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Kyoto, Japon, K. Okada éd., p. 173-186.
- HOEK, E., BROWN, E.T. (1980) *Underground excavations in rock*, London (Angleterre), The institution of mining and metallurgy, 527 pages.
- HUTCHISON, I. P. G. (1990) *Mine waste disposal initiatives in California*. Waste Geotechnics. Geotechnical News, March 1990, p. 28-32.
- JAVED, I. BHATTY, SANKAR BHATTACHARJA (1996) *Use of cement kiln dust in stabilizing clay soils*, Portland Cement Association, 28 pages.
- JAWAD, I., SKALNY, J. (1977) *Alkalies in cement: a review. forms of alkalies and their effect on clinker formation*, Cement and concrete research., vol. 7, 719 pages.
- KAWAKAMI, F. (1958) *Compaction Methods and Field Moisture Content of the Earth Core for Earth Dams Using the Moist Materials*, Sixth Congress on Large Dams, New-York, 1958, Report 28, Question N. 22, p. 165-183.
- KOERNER, R. M. (1990) *Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering*. McGraw-Hill Designing, 250 pages.
- KOERNER, R.M., RICHARDSON, G.N. (1987) *Design of geosynthetic system for waste disposal*, Proceedings of geotechnical practice for waste disposal, An Arbor, USA, p. 65-85.
- KOMARINSKII, M.V., BALLYAATOV, G.Y. (1983) "Improvement of the Construction of Earth Structures", Hydrotechnical Construction, vol. 17, no 11, November, p 572-578.
- LACHAUD, R. (1979) *Thaumasite et ettringite dans les matériaux de construction*, Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Paris, n. 370, p. 3-7.
- LAFUMA, H. (1929) Revue matériaux de construction et travaux publics, p.243-441
- LEROUEIL, S., BOUCHARD, R., BOURRET, M. (1990a) *Influence des conditions de mise en place sur la performance d'une membrane d'argile*. Comptes-rendus 43e Conférence canadienne de géotechnique, Québec, p. 369-375.

- LEROUEIL, S., SAVARD, Y., et BOUCHARD, R. (1991b) *Comportement de la membrane d'argile d'un étang aéré en région froide*. 1ère Conférence canadienne de géotechnique environnementale. Montréal, Québec, p. 215-223.
- LEVAQUE, J.G., DUCHENE, M., NORMANDIN, S. [1992] *Variabilité du retour des poussières de four. Usine St-Constant*. Lafarge Canada Inc. C.T.S., 22 pages.
- LITVAN, G.G. (1972) *Phase transition of adsorbates: IV mechanism of frost action in hardened cement*, Journal of the american ceramic society, p.38-42.
- MALHOTRA, V.M. (1989) *Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton*, les publications de CANMET, Ottawa, Canada, 468 pages.
- McCOY, W.J., KRINER, R.W. (1971) *Use of waste kiln dust for soil consolidation*, Lehigh Portland Cement Co., Allentown, Pennsylvania, USA.
- MEHTA, P.K. (1973) *Mechanism of expansion associated with ettringite formation*, Cement and concrete research, vol.3, p.1-6.
- MEHTA, P.K. (1986) *Concrete structure, properties and materials*, Prentice Hall inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 450 pages.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. (1993) *Concrete, structure properties and materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 548 pages.
- MENVIQ, Direction des laboratoires (1985) *Procédure d'évaluation des caractéristiques des déchets solides et des boues pompables*, Éditeur officiel du Québec. 27 pages.
- MENVIQ. (1993) *Politique de réhabilitation des terrains contaminés*, Gouvernement du Québec, Direction des politiques du secteur industriel, 52 pages.
- MIDNESS, S., YOUNG, J.F. (1981) *Concrete*, Prentice Hall inc., Englewood Cliffs, NJ, 671 pages.
- MILLER, C.T., BENSCH, D.G., COBRY, D.C. (1980) *Use of cement-kiln dust and fly ash in pozzolanic concrete base courses*. Transportation research record 754, Transportation research board national academy of sciences, p-36-41.
- MITCHELL, J. K. (1976) *Fundamentals of soil Behavior*. John Wiley and Sons. Clay. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 91, SM4. p. 41-65.
- MITCHELL, J. K., MADSEN, F. T. (1987) *Chemical effects on clay hydraulic conductivity*. Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, p. 87-105.
- MORGENSTERN, N. R. (1985) *Geotechnical aspects of environmental control*, Proc, 11th Int. Cof. Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, p. 155-185.
- MOUKWA, M. (1988) *Durabilité du béton dans les mers arctiques*, Sherbrooke, Thèse de doctorat es sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 464 pages.

- NAPIERALA, R. (1983) "*Stabilization of the Subsoil with the Dust From the Kilns for Portland Cement Clinker Burning*", Cement-Wapno-Gips Vol XXXVI/L, No 4, p. 127-128.
- NEGRO, A., BACHIORRINI, A. (1982) *Expansion associated with ettringite formation at different temperatures*, Cement and concrete research, VOL.12, P. 677-684.
- NICHOLSON, J.P. (1977) "Mixture for pavement bases and the like", U.S. Patent # 4,018,617.
- NIEMANTS, P. (1981) *Étude du comportement des voiles d'étanchéité injectés dans les fondations rocheuses de barrage*, Sherbrooke, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 320 pages.
- OGATA, A. (1970) *Theory of dispersivity in granular medium*, USA, Geological survey, Professional paper 411-1, 39 pages.
- ONOFREI, M., GRAY, M.N., BRETON, D., BALLIVY, G (1991) *The effect of leaching on the pore structure of cement based grouts for use in nuclear fuel waste disposal*, Material research society symposium proceeding, vol.212, Materials Research society, Pittsburgh, Pennsylvania, p.417-425.
- OWEIS, I.S., KHERA, R.P. (1990) *Geotechnology of Waste Management*. Butterworths, p 67-75.
- PALARDY, D. (1996) *Étude comparative sur la durabilité de coulis à base de ciment soumis à différentes conditions retrouvées potentiellement dans un site de stockage souterrain de déchets nucléaires*, Maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 181 pages.
- PCA (Association du ciment Portland) (1991) *Solidification and stabilization of waste using Portland Cement*, U.S.A., 16 pages.
- PCA (Association du ciment Portland) (1992) *An analysis of selected trace Metals in Cement and kiln dust*, U.S.A., 35 pages.
- PERRATON, D., AITCIN, P.C., VEZINAS, D. (1988) *Permeabilities of silica fume concrete, Permeability of concrete*, Publication SP-108, American Concrete institute, Détroit, p 63-84.
- PIGEON, M., PERRATON, D., PLEAU, R. (1987) *Scaling test of silica fume concrete and the critical spacing factor concept*, Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, A.C.I SP-100, J.M.
- POWERS, T.C. (1949) *The air requirement of frost-resistant concrete*, Proceedings of the Highway Research Board, vol. 29, p. 184-211.
- POWERS, T.C. (1975) *Freezing effects in concrete durability of concrete*, SP. 47, AC 7, p.1-11.
- POWERS, T.C., HELMUTH, R.A. (1953) *Theory of volume change in hardened portland cement paste during freezine*, PCA research department bulletin, n. 46, p. 285-297.

- QUIGLEY, R.M., YANFUL, E.K., FERNANDEZ, F. (1987) *Ion transfer by diffusion through clayey barriers*, Proceeding of Geotechnical Practice for Waste Disposal, An Arbor, USA, p. 137-158.
- REGOURD, M. (1986) *Application of X-ray diffraction to some problems of the cement industry*, Chemical scripta, n. 26 A, p. 37-45.
- REGOURD, M. (1993) *Notes de cours de microstructures de L'ENS*, Cachan, France, 20 pages.
- REGOURD, M., MORTUREUX, E., GAUTHIER, E. (1981) *Hydraulic reactivity of various pozzolanas*, Proceeding of 5th International Conference on Cement, Monterey, Mexico, V.M. Malhotra éd., p 1-14.
- REVERTÉGAT, E., RICHET, C., GÉGOUT, P. (1992) "Effect of pH on the durability of cement pastes", Cement and Concrete Research, vol. 22, no 2/3, p. 259-272.
- RHOUZLANE, S. (1986) *Rhéologie des mixtures solides-liquides*, Doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg, France, 102 pages.
- RHOUZLANE, S., BALLIVY, G., BELLALLOUI, A. (1995) *Consolidation et stabilisation des poussières de four de cimenterie: optimisation des mélanges*, rapport GR-95-08-31, Université de Sherbrooke, Laboratoire de mécanique des roches, 42 pages.
- RHOUZLANE, S., BALLIVY, G., BELLALLOUI, A., PIOTTE, M. (1995) *Consolidation et stabilisation des poussières de four de cimenterie: Étude de la variabilité chimique des CKD*, rapport n. GR-95-03-04, Université de Sherbrooke, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, 22 pages.
- RHOUZLANE, S., BELLALLOUI, A., BALLIVY, G., LEVAQUE, J.G. (1997) *Réalisation de barrières environnementales à base de poussières de four de cimenterie*, 65^e Congrès de l'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (Acfas), Trois-Rivières, Québec, CANADA, 23 pages.
- RHOUZLANE, S., PALARDY, D., BALLIVY, G. (1996) *Evaluation of CKD and FA amended CKD as landfill cover material*, Lafarge - Alpena field test program, rapport GR-96-07-02, Université de Sherbrooke, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, 30 pages.
- RHOUZLANE, S., PALARDY, D., BALLIVY, G. (1997) *Synthesis of the laboratory and field work study on the evaluation of CKD and FA amended CKD as landfill cover material*, Lafarge - Alpena, rapport GR-96-12-03, Université de Sherbrooke, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, 119 pages.
- RITCEY, G.M. (1989) "Tailings Management - Problems and Solutions in the Mining Industry", Elsevier.
- RMT (1992) "Physical and leach testing of solidified Lafarge - Alpena plant CKD", prepared for Lafarge Corp., 15 p.

- ROBERT, A., FABRE, D. (1987) *Ruptures en souterrain - Rapport sur le gonflement - Comité français de mécanique des roches*, 52 pages.
- ROBERT, J., YONLEY, C., SHREIBER, R.J. (1992) *Cement kiln recycling: An innovative approach to waste management*, Canadian Portland Association, International Symposium, Calgary, AB, Canada, p. 1-6.
- ROCHE Inc. (1987) *Assainissement des eaux et revitalisation des terrils - Parc à résidus des mines Solbec et Cupra*, Rapport d'étude pour le compte du centre de recherche minérales du ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Québec.
- ROUIS, M.J. (1991) *Conception et caractérisation de barrières hydrogéologiques à partir de poussières de four de cimenterie*, Ph.D., Université de Sherbrooke, 277 pages.
- ROUIS, M.J., BALLIVY, G., BENSALAH, A. (1990) "Phosphogypsum management in Tunisia: Environmental problem and required solutions", Third international symposium on Phosphogypsum, Orlando, FL, U.S.A.
- ROWE, R.K. (1987) *Pollutant transport through clayey barriers*, Proceeding of Geotechnical Practice for Waste Disposal, An Arbor, USA, p.159-181
- ROWE, R.K. (1988) "Contaminant migration through groundwater - The role of modelling in the design of barriers", Eleventh canadian geotechnical colloquium, Journal canadien de géotechnique, vol. 25, no 4, p. 778-798.
- ROWE, R.K., BOOKER, J.R. (1996) *Programme Pollute 1D: Pollutant migration analysis program*, London, Ontario, CANADA, SACDA University of Western Ontario
- SADO, G., SADO, M.C. (1991) *Les plans d'expérience, de l'expérimentation à l'assurance qualité*, AFNOR, France, 263 p.
- SAMET, B. (1995) *Effets des paramètres de cuisson sur la distribution des alcalis et sur l'hydratation des ciments*, Thèse de doctorat ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, 200 pages.
- SAMET, B., TAGNIT-HAMOU, A., SARKAR, S.L. (1992) *The effect of minor kiln variations upon clinker quality*, World Cement, june, p. 12-17.
- SAYAH, A.I. (1993) *Stabilisation of expansive clay using cement kiln dust*, M.Sc. Thesis, Graduate School, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, USA, 225 pages.
- SHACKELFORD, C. D. (1990) Transit-time design of earthen barriers. *Engineering Geology*, Vol. 29, p. 79-94.
- SHÉRARD, J.L. (1963) *Earth and Earth-Rock Dams*, John Wiley and Sons, Inc., 725 pages.
- SHOIRY, J. (1985) *Étude sur les eaux de lixiviation du lieu d'enfouissement de Saint-Côme de Kennebec*, Sherbrooke, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, université de Sherbrooke, 130 p.

- SMITH, R.F., LEVIN, J.E. (1979) *Multimedia assesment and environment research needs of cement industry*, Alexandria (U.S.A), Environnemental protection technologie series E.P.A., n. 60012-79-111, 92 pages.
- STRUNGE, J., KNÖFEL, D., DREIGLER, I. (1986) *Influence of alkalies and sulfates of the properties of cement taking account of the alumina ration and lime standard*, Zement-Kalk Gips, n.8, 386 pages.
- TAGNIT-HAMOU, A. (1996) *Notes de cours de microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*. (GCI 712) Université de Sherbrooke, Québec, Canada. 281 pages.
- TAYLOR, F.W. (1993) "Non-Expansive and Expansive Formation of Calcium Hydroxide", Conférence CRIB, Université de Sherbrooke.
- THORVALDSON, T. (1952) *Chemical aspects of the durability of products*, Proceedings of third international symposium of cements, London, Cement and concrete associations, 463 pages.
- TODRES (1992) *Cement Kiln Dust: Field Compaction and Resulting Permeability*, Research and Development, Bulletin RD 106T, PCA, Skokie, Illinois, USA, 22 pages.
- TODRES, H.A., MISHVLOVICH, A., AHMED, J. (1992) *cement kiln dust management: Permeability*, PCA, research and development bulletin, RD 103 T, p. 1-8.
- VALEUX, J.C. (1980) *Classification Des compacteurs*, Colloque international sur le compactage, Paris, Vol. 2, p. 697-702.
- VAN IMPE, W.F., BOUAZZ, A. (1996) *Barrières d'étanchéité dans les sites de décharges: développement récents*, Revue française de géotechnique, numéro 74, p. 3-18.
- VINCENT, A. (1993) *Entreposage des déchets de cimenterie en carrière rocheuse*, Rapport de stage GR-93-09-03, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 116 pages.
- ZAMAN, M., LAGUROS, J.G. et SAYAH, A. (1992) "Soil Stabilization using Cement Kiln Dust", in 7th International Conference on Expansive soils, Dallas, Texas, USA, p. 1-5.